

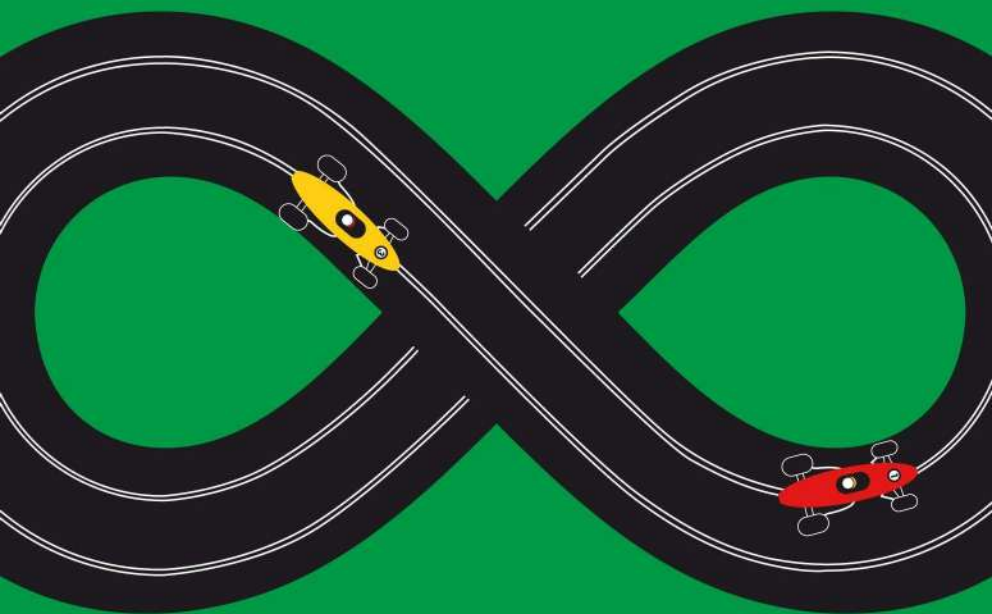
A C A N T I L A D O

Marcus du Sautoy

Lo que no podemos saber

Exploraciones en la frontera
del conocimiento

TRADUCCIÓN DE
EUGENIO JESÚS GÓMEZ AYALA



El Acantilado, 365

LO QUE NO
PODEMOS SABER

MARCUS DU SAUTOY

LO QUE NO
PODEMOS SABER

EXPLORACIONES EN LA
FRONTERA DEL CONOCIMIENTO

TRADUCCIÓN DEL INGLÉS
DE EUGENIO JESÚS GÓMEZ AYALA

BARCELONA 2018



A C A N T I L A D O

TÍTULO ORIGINAL *What We Cannot Know*

Publicado por
A C A N T I L A D O
Quaderns Crema, S.A.

Muntaner, 462 - 08006 Barcelona
Tel. 934 144 906 - Fax. 934 636 956
correo@acantilado.es
www.acantilado.es

© 2016 by Marcus du Sautoy
© de la traducción, 2018 by Eugenio Jesús Gómez Ayala
© de esta edición, 2018 by Quaderns Crema, S.A.

Derechos exclusivos de edición en lengua castellana:
Quaderns Crema, S.A.

ISBN: 978-84-16748-89-1
DEPÓSITO LEGAL: B. 4629-2018

AIGUADEVIDRE *Gráfica*
QUADERNS CREMA *Composición*
ROMANYÀ-VALLS *Impresión y encuadernación*

PRIMERA EDICIÓN *marzo de 2018*

Bajo las sanciones establecidas por las leyes,
quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización
por escrito de los titulares del copyright, la reproducción total
o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento mecánico o
electrónico, actual o futuro—incluyendo las fotocopias y la difusión
a través de Internet—, y la distribución de ejemplares de esta
edición mediante alquiler o préstamo públicos.

CONTENIDO

<i>Frontera cero: lo que sabemos que no sabemos</i>	7
Primera frontera: los dados de casino	27
Segunda frontera: el violonchelo	97
Tercera frontera: el pomo de uranio	163
Cuarta frontera: el universo con recortables	233
Quinta frontera: el reloj de pulsera	307
Sexta frontera: el robot parlante	379
Séptima frontera: el <i>cracker</i> navideño	455
<i>Agradecimientos</i>	533
<i>Procedencia de las ilustraciones</i>	535
<i>Lecturas complementarias</i>	537
<i>Índice</i>	547

*A mis padres,
que me animaron a emprender este viaje
hasta las fronteras del conocimiento.*

FRONTERA CERO: LO QUE SABEMOS QUE NO SABEMOS

Todos los hombres desean por naturaleza saber.

ARISTÓTELES, *Metafísica*

La ciencia es la reina.

Todas las semanas aparecen titulares que anuncian nuevos adelantos en nuestra comprensión del universo, nuevas tecnologías que transformarán nuestro entorno, nuevos avances médicos que prolongarán nuestras vidas. La ciencia nos está dando perspectivas insospechadas sobre algunas de las grandes cuestiones que han desafiado a la humanidad desde el momento en que ésta acertó a formularlas. ¿De dónde venimos? ¿Cuál es el destino último del universo? ¿Cuáles son los constituyentes básicos del mundo físico? ¿Cómo un conjunto de células se vuelven conscientes?

En el lapso de los diez últimos años, hemos logrado posar un vehículo espacial sobre un cometa, hemos fabricado robots que pueden crear su propio lenguaje, hemos usado células madre para reparar el páncreas de los enfermos de diabetes, hemos descubierto cómo usar el poder de la mente para que sepa manipular por sí sola un brazo robótico y hemos secuenciado el ADN de una muchacha que vivió en las cavernas hace cincuenta mil años. Así de vasto es nuestro conocimiento. Los avances de la ciencia generan una gran adicción.

La ciencia nos ha proporcionado la mejor arma para luchar contra el destino. En vez de rendirse a la devastación que generan las enfermedades y los desastres naturales, la ciencia ha creado vacunas para combatir virus mortales como el de la polio o incluso el del ébola. Ante el problema de una población mundial siempre creciente, los avances científicos pro-

porcionan la mejor esperanza de conseguir alimentar a los 9.600 millones de personas que vivirán en 2050. La ciencia es la que nos está avisando del impacto mortal al que estamos sometiendo nuestro entorno y la que nos da la oportunidad de hacer algo antes de que sea demasiado tarde. Un asteroide podría haber barrido a los dinosaurios, pero la ciencia que hemos desarrollado los humanos es nuestro mejor escudo para hacer frente a los choques directos que puedan producirse en el futuro. En la lucha constante de la raza humana contra la muerte, la ciencia es su mejor aliada.

La ciencia es la reina no sólo en lo tocante a la lucha por la supervivencia, sino también a la hora de mejorar nuestra calidad de vida. Somos capaces de comunicarnos con los amigos y con la familia a través de enormes distancias. Disfrutamos de un acceso incomparable a las bases de datos que recogen los conocimientos que hemos acumulado durante generaciones consagradas a la investigación. Hemos creado mundos virtuales con los que podemos evadirnos en el tiempo libre. Podemos recrear en el salón las grandes interpretaciones de Mozart, Miles y Metallica con sólo pulsar un botón.

El deseo de saber está programado en la psique humana. Los primeros humanos que tuvieron sed de conocimiento son los que sobrevivieron, se adaptaron y transformaron su entorno. Los que no sufrieron el impulso de este afán se quedaron atrás. La evolución ha favorecido a las mentes que desean conocer los secretos del funcionamiento del universo. La subida de adrenalina que acompaña al descubrimiento de nuevos saberes es el modo que tiene la naturaleza de decirnos que el deseo de saber es tan importante como el impulso por reproducirnos. Como formuló Aristóteles en la primera línea de su *Metafísica*, comprender cómo funciona el mundo constituye una necesidad humana básica.

En mis años escolares, la ciencia me acogió pronto con los brazos abiertos. Caí entusiasmado ante su extraordinario poder para explicarnos tal cantidad de cosas sobre el univer-

so. Las historias fantásticas que nos contaban los profesores de las asignaturas de ciencias parecían más imaginativas incluso que los libros de ficción que había leído en casa. Dominado por este conjuro, consumía todas las ofertas de ciencia que caían en mis manos.

Convencí a mis padres para que me pagaran una suscripción al *New Scientist*. Devoraba el *Scientific American* en la biblioteca cercana a mi casa. Todas las semanas acaparaba el televisor para seguir los episodios de mis programas científicos favoritos: *Horizon* y *Tomorrow's World*. Quedé atrapado por las series *Ascent of Man* de Jacob Bronowski, *Cosmos* de Carl Sagan y *Body in Question* de Jonathan Miller. En Navidades, las Conferencias Navideñas de la Institución Real me proporcionaban una buena ración de ciencia en conjunción con el pavo familiar. Mis calcetines aparecían llenos de libros de George Gamow y de Richard Feynman. Aquellos eran tiempos embriagadores, en los que todas las semanas se anunciaban nuevos adelantos.

Al tiempo que leía estas historias de descubrimientos, empecé a sentirme cada vez más intrigado por los aspectos que no se contaban en ellas. Lo que sabíamos pertenecía al pasado, pero lo que todavía no sabíamos pertenecía al futuro, a mi futuro. Me obsesioné con los libros de rompecabezas del matemático Martin Gardner que me dio mi profesor. La emoción de luchar contra un enigma y la repentina descarga de euforia que suponía resolver cada problema me crearon adicción por la droga del descubrimiento. Aquellos problemas fueron mi campo de entrenamiento para el desafío, más grande, de afrontar cuestiones que no tenían una respuesta al final del libro. Las preguntas sin respuesta, los misterios matemáticos y los dilemas científicos que nadie había resuelto habrían de convertirse en el combustible de mi vida científica.

LO QUE SABEMOS

Si vuelvo la vista a los años setenta, cuando estaba en el colegio, y comparo aquello que entonces sabíamos con lo que sabemos hoy, resulta extraordinario lo mucho que hemos comprendido del universo solamente en el medio siglo que he vivido. La tecnología ha ampliado la capacidad de nuestros sentidos de modo que podemos ver cosas que estaban fuera del alcance de los científicos que me entusiasmaron cuando era niño.

Los nuevos modelos de telescopio que escudriñan los cielos nocturnos han descubierto planetas similares a la Tierra que podrían albergar vida inteligente. Han revelado el hecho sorprendente de que, a partir de los tres cuartos del ciclo de vida del universo, la expansión de éste comenzó a acelerarse. Recuerdo haber leído cuando niño que nos encaminábamos hacia un gran colapso, pero ahora parece que nos espera un futuro completamente distinto.

Los aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN (la Organización Europea para la Investigación Nuclear, en Suiza) nos han permitido penetrar en los entresijos de la misma materia y han desvelado nuevas partículas—como el quark cima, descubierto en 1994, y el bosón de Higgs, descubierto en 2012—, que eran sólo retazos de matemática especulativa cuando yo leía en el colegio mi ejemplar de *New Scientist*.

Y desde los primeros años de la década de los noventa, las imágenes por resonancia magnética funcional (fMRI, por sus siglas en inglés) nos han permitido mirar dentro del cerebro y descubrir cosas que en los años setenta francamente no eran consideradas siquiera competencia de los científicos. El cerebro era terreno acotado de filósofos y teólogos, pero hoy la tecnología puede revelar cuándo uno está pensando en Jennifer Aniston o predecir qué haremos incluso antes de que nosotros mismos lo sepamos.

La biología ha visto una explosión de avances. En 2003 se anunció que los científicos habían determinado una secuen-

cia completa de ADN humano que consta de tres mil millones de letras de código genético. En 2011 se publicó la red neuronal completa del gusano *C. elegans*, que proporcionaba una descripción exhaustiva de cómo están conectadas entre sí las 302 neuronas del gusano.

Los químicos han abierto también nuevos horizontes. En 1985 se descubrió una forma totalmente nueva del carbono, ensamblada como un balón de fútbol, y los químicos nos volvieron a sorprender en 2003 creando los primeros ejemplos de grafeno, que mostraban cómo el carbono puede formar un panal hexagonal con el espesor de un átomo.

Y en mis tiempos, la disciplina a la que acabaría dedicándome, las matemáticas, ha visto cómo se resolvían finalmente algunos de los grandes enigmas: el último teorema de Fermat y la conjetura de Poincaré, dos retos que habían burlado a muchas generaciones de matemáticos. Nuevas ideas y herramientas matemáticas han desbrozado caminos ocultos para transitar por el universo matemático.

Estar al tanto de todos estos nuevos avances, por no hablar de hacer alguna contribución propia, es un reto en sí mismo.

LA CÁTEDRA DEL PROFESOR SABELOTODO

Hace unos años conseguí añadir un nuevo título a mis tareas como profesor de matemáticas en la universidad de Oxford que suele arrancarme una sonrisa: Profesor Simonyi para la Comprensión Pública de la Ciencia. Parece que existe la creencia de que poseer este título hace que deba saberlo todo. La gente me llama por teléfono suponiendo que conozco la respuesta de cualquier cuestión científica. Poco después de haber aceptado el título, se anunció el Premio Nobel de Medicina. Un periodista me llamó en busca de una explicación del avance que se premiaba: el descubrimiento de los telómeros.

La biología nunca ha sido uno de mis fuertes, pero estaba sentado frente a la pantalla del ordenador y, aunque me

avergüence decirlo, busqué la página de Wikipedia sobre los telómeros y, después de un repaso rápido, me puse a explicar con autoridad que son la porción del código genético situado al extremo de los cromosomas que controla el envejecimiento, entre otras cosas. La tecnología que tenemos al alcance de la mano ha incrementado la sensación de que poseemos la capacidad de saberlo todo. Basta teclear una pregunta en un motor de búsqueda y la máquina parece predecir, incluso antes de terminar de escribir, qué es lo que queremos saber, y proporciona una lista de sitios en los que encontrar la respuesta.

Pero entender algo no es lo mismo que disponer de una lista de hechos. Para un científico, ¿es posible saberlo todo? ¿Saber cómo resolver ecuaciones en derivadas parciales no lineales? ¿Saber cómo $SU(3)$ gobierna las relaciones entre las partículas fundamentales? ¿Saber cómo la inflación cósmica da origen al estado del universo? ¿Saber cómo resolver las ecuaciones de Einstein referentes a la relatividad general o la ecuación de ondas de Schrödinger? ¿Saber cómo las neuronas y las sinapsis desencadenan el pensamiento? Seguramente Newton, Leibniz y Galileo fueron los últimos científicos en conocer todo lo conocido en su tiempo.

Debo admitir que la arrogancia propia de la juventud me inculcó la creencia de que podría entender cualquier cosa que se supiera. Que un cerebro humano encontrara el modo de abrir una senda que conducía a nuevos conocimientos significaba que el mío también era capaz. Con el tiempo suficiente, pensaba, podría descifrar los misterios de las matemáticas y del universo, o al menos dominar el estado actual del conocimiento sobre ellos. Pero, cada vez más, estoy empezando a poner en duda esta creencia, y presiento que algunas cosas quedarán para siempre fuera de mi alcance. Con frecuencia tengo que estrujarme mucho el cerebro para manejarme con la ciencia que conocemos hoy. Se acaba el tiempo de conocerlo todo.

Mis propias investigaciones matemáticas están rebasando ya los límites de lo que mi cerebro humano se siente capaz de entender. He estado trabajando durante más de diez años en una conjetura que se resiste obstinadamente ante mis esfuerzos por descifrarla. Pero mi nueva tarea como Profesor para la Comprensión Pública de la Ciencia me ha sacado de la zona de confort de las matemáticas y me ha arrastrado hacia los engorrosos conceptos de las neurociencias, las resbaladizas ideas de la filosofía y las infundadas teorías de la física. Ha requerido una manera diferente de pensar que es ajena a mi pensamiento matemático, que maneja certezas, demostraciones y precisión. Mi pretensión de entender todo lo que hoy se considera conocimiento científico ha puesto a prueba drásticamente los límites de mi capacidad de entender.

El proceso de alcanzar conocimientos se basa necesariamente en encaramarse a hombros de gigantes, como declaró Newton en una famosa frase, a propósito de sus propios descubrimientos. Por eso mi viaje hasta las fronteras del conocimiento ha implicado leer sobre cómo otros han articulado el estado actual del conocimiento, escuchar conferencias y seminarios ofrecidos por los especialistas del área que trato de entender, charlar con los que están ganando terreno en la linde con lo desconocido, poner en duda explicaciones contradictorias, consultar las pruebas y los datos recogidos en las revistas científicas que apoyan una teoría, a veces hasta echar una ojeada sobre una idea en Wikipedia. Aunque enseñamos a los estudiantes a poner en duda toda información que surja de una búsqueda con Google, una investigación más detenida ha revelado que las descripciones que proporciona la Wikipedia de los temas situados en el extremo menos controvertido del espectro científico, como la teoría de la relatividad general, son consideradas de una calidad pareja a la de las descripciones ofrecidas en la literatura científica. Pero si uno escoge un asunto más polémico, como el cambio climático, el contenido puede depender del día en que uno mire.

Esto plantea la cuestión de hasta qué punto puede uno fiarse de estos informes. El mero hecho de que la comunidad científica acepte una explicación como la que más se ajusta al momento presente no quiere decir que sea cierta. La historia muestra, una y otra vez, que ocurre justo lo contrario, y esto debe servirnos de aviso de que el actual conocimiento científico es provisional. Las matemáticas tienen quizá características ligeramente diferentes, como explicaré en los dos capítulos finales. La demostración, en las matemáticas, ofrece la posibilidad de establecer un conocimiento más permanente. Pero merece la pena señalar que, incluso cuando se innova en matemáticas, suelen citarse resultados de otros colegas cuyas demostraciones uno no ha comprobado personalmente. Hacerlo sería como correr para no moverse del sitio.

Y el auténtico reto para cualquier científico es no quedarse retenido en el jardín seguro de lo conocido, sino aventurarse en el terreno salvaje de lo desconocido. Este reto es el que late en este libro.

LO QUE NO SABEMOS

A pesar de todos los avances conseguidos por la ciencia en los últimos siglos, todavía hay muchos profundos misterios que siguen esperando a que los resolvamos. Cosas que no sabemos. El conocimiento de lo que no sabemos parece crecer más rápidamente que nuestro catálogo de descubrimientos. Lo que sabemos que no sabemos supera a lo que sabemos que sabemos. Y esas cosas que no sabemos son las que impulsan la ciencia. Los científicos se interesan más en aquello que no comprenden que en hablar de los fenómenos que ya sabemos cómo explicar. La ciencia es un ente vivo y palpitante gracias a todas esas preguntas que no sabemos contestar.

Por ejemplo, la sustancia que constituye el universo físico con el que interactuamos parece representar solamente un 4,9 % de la materia total del universo. Pero entonces ¿de

qué está hecho el otro 95,1 %, las llamadas materia y energía oscuras? Si se acelera la expansión del universo, ¿de dónde viene la energía que alimenta esta aceleración?

¿Es el universo infinito? ¿Hay infinitos universos paralelos al nuestro? Si los hay, ¿tienen leyes físicas diferentes? ¿Existían otros universos antes de que surgiera nuestro universo del Big Bang, la Gran Explosión? ¿Existía el tiempo antes de la Gran Explosión? ¿Existe el tiempo de un modo absoluto o aparece como consecuencia de conceptos más fundamentales?

¿Por qué existe un estrato de partículas fundamentales y otras dos copias casi idénticas de este estrato pero con masas crecientes, las llamadas tres generaciones de partículas fundamentales? ¿Hay más partículas que todavía no hayamos descubierto? ¿Son las partículas fundamentales diminutas cuerdas que vibran en el espacio de once dimensiones?

¿Cómo podemos unificar la teoría de la relatividad general formulada por Einstein, la física de lo muy grande, con la física cuántica, la física de lo muy pequeño? Lo que se busca aquí es lo que se llama la gravedad cuántica, algo absolutamente necesario aunque solamente pretendiéramos entender la Gran Explosión, el momento en el que el universo fue reducido al reino de lo cuántico.

Y qué decir de la comprensión del cuerpo humano, algo tan complejo que hace que la física cuántica parezca un ejercicio propuesto en la escuela secundaria. Se está todavía tratando de entender correctamente la compleja interacción entre la expresión génica y el entorno. ¿Se podrá encontrar una cura para el cáncer? ¿Es posible vencer al envejecimiento? ¿Entre los que hoy vivimos habrá alguien que alcance los mil años?

¿Y si nos preguntamos de dónde vienen los humanos? La evolución es un proceso de mutaciones aleatorias, de modo que ¿algún otro resultado de los dados de la evolución podría haber producido también organismos con ojos? Si rebo-

bináramos la evolución y la reiniciáramos, ¿obtendríamos vida inteligente o somos el resultado de una tirada feliz de los dados? ¿Existe vida inteligente en algún otro punto del universo? ¿Y qué hay de la tecnología que estamos creando? ¿Podrá un ordenador adquirir alguna vez conciencia? ¿Podremos finalmente descargar la conciencia en un ordenador y seguir vivos después de la muerte del cuerpo?

Las matemáticas tampoco están ni mucho menos acabadas. A pesar de lo que crea la gente, el último teorema de Fermat no era el último teorema. Abundan los fenómenos matemáticos desconocidos. ¿Hay algún patrón que regule los números primos o éstos se presentan al azar? ¿Lograremos resolver las ecuaciones matemáticas de la turbulencia? ¿Comprenderemos alguna vez cómo factorizar números grandes de modo efectivo?

A pesar de lo mucho desconocido que aún resta, los científicos son optimistas y piensan que estas cuestiones no quedarán sin respuesta para siempre. Las últimas décadas proporcionan razones para creer que estamos en una edad de oro de la ciencia. La velocidad con la que se producen descubrimientos en la ciencia parece crecer exponencialmente. En 2014 la revista científica *Nature* señaló que el número de artículos científicos que se publican se duplica cada nueve años desde el fin de la Segunda Guerra Mundial. Los ordenadores también se desarrollan a un ritmo exponencial. La ley de Moore se basa en la observación de que la potencia de procesamiento de los ordenadores parece duplicarse cada dos años. El ingeniero Ray Kurzweil defiende que lo mismo ocurre con el progreso tecnológico: el ritmo de cambio de la tecnología en los próximos cien años será comparable al experimentado en los últimos veinte mil años.

Pero ¿pueden los descubrimientos científicos mantener este crecimiento exponencial? Kurzweil habla de la «singularidad», que será el momento en el que la inteligencia tecnológica superará a la inteligencia humana. ¿Estará el pro-

greso científico abocado a su propia singularidad? El día en el que lo sepamos todo. De hecho, seguramente en algún momento podríamos descubrir las ecuaciones subyacentes que explican cómo funciona el universo. Descubriremos la lista final de las partículas que forman los constituyentes básicos del universo y cómo interactúan entre sí. Algunos científicos creen que con el ritmo actual de progreso científico llegará un momento en el que podremos descubrir una teoría del todo. Hasta le han dado un nombre: TOE («Theory of Everything»).

Como afirmó Hawking en *Breve historia del tiempo*: «Todavía creo que hay razones para un optimismo prudente sobre el hecho de que podamos estar ahora cerca del final de la búsqueda de las leyes últimas de la naturaleza», frase que concluyó teatralmente con la afirmación provocativa de que en tal caso «conoceríamos el pensamiento de Dios».

¿Es posible algo así? ¿Saberlo todo? ¿Sería deseable saberlo todo? La ciencia se anquilosaría. Los científicos mantienen una relación extrañamente esquizofrénica con lo desconocido. Por un lado, lo que nos intriga y fascina es lo que no sabemos, pero por el otro, lo que prueba el éxito de un científico es que aporte soluciones y conocimiento, que convierta lo desconocido en conocido.

¿Podría haber algunos enigmas que nunca se resolverán? ¿Hay límites que acotan lo que podemos descubrir del mundo físico? ¿Existen regiones del futuro que están fuera del poder predictivo de la ciencia y de las matemáticas? ¿Es el tiempo antes de la Gran Explosión terreno vedado? ¿Existen ideas tan complejas que se hallan fuera del alcance de los cerebros finitos de los humanos? ¿Pueden los cerebros investigar sobre ellos mismos, o este análisis entra en un círculo vicioso infinito del que es imposible escapar? ¿Existen conjeturas matemáticas que nunca podrán probarse?

¿Qué ocurriría si hubiera cuestiones científicas que no podrán resolverse nunca? Parece derrotista, incluso peligroso, admitir que puedan existir tales cuestiones. Del mismo modo que lo desconocido es la fuerza motora para hacer ciencia, lo incognoscible sería su principal contrincante. Como miembro pleno de la comunidad científica, tengo la esperanza de que podremos finalmente responder a las grandes cuestiones sin resolver. Por eso es importante saber si la expedición que voy a emprender topará con barreras infranqueables. Cuestiones que nunca quedarán cerradas.

Éste es el reto que me he propuesto afrontar en este libro. Quiero saber si hay cosas que por su misma naturaleza nunca conoceremos. ¿Hay cosas que estarán siempre más allá de los límites del conocimiento? A pesar del avance rampante de la ciencia, ¿existe aquello que se quedará fuera del alcance incluso de los mejores científicos? ¿Quedarán misterios que resistan nuestros esfuerzos por quitarles los velos que ahora enmascaran nuestra visión del universo?

Por supuesto, en cualquier momento de la historia, es muy arriesgado tratar de articular las «cosas que no podemos saber». ¿Cómo puede saberse qué nuevas ideas van a trasladar de golpe lo desconocido al terreno de lo cognoscible? En parte por esto, es útil analizar la historia de cómo sabemos lo que sabemos, porque revela las veces que hemos estado en un punto en el que creíamos haber alcanzado la frontera, para descubrir poco después un camino para cruzarla.

Pensemos en lo que afirmó el filósofo francés Auguste Comte en 1835 sobre las estrellas: «Nunca podremos estudiar, con ningún método, su composición química o su estructura mineralógica». Una afirmación absolutamente razonable, dado que este conocimiento parecía depender del hecho de poder visitar las estrellas. Lo que Comte no había tenido en cuenta era la posibilidad de que fueran ellas las que nos visitaran a nosotros, o al menos que los fotones

de luz emitidos por las estrellas podrían revelar su composición química.

Pocas décadas después de la profecía de Comte, los científicos han determinado la composición química de nuestra propia estrella, el Sol, analizando el espectro de la luz que emite. Como dijo el astrónomo británico del siglo XIX Warren de la Rue: «Si fuéramos hasta el Sol, trajéramos algunos trozos de él y los analizáramos en el laboratorio, no podríamos examinarlos mejor que con este nuevo método de análisis espectral».

Los científicos determinaron a continuación la composición química de estrellas que con certeza casi absoluta no visitaremos nunca. A medida que la ciencia desarrollada en el siglo XIX nos fue permitiendo comprender cada vez mejor los misterios del universo, comenzó a surgir la sensación de que podríamos conseguir finalmente una perspectiva completa.

En 1900 Lord Kelvin, considerado por muchos como uno de los científicos más prominentes de su tiempo, creyó que había llegado ya ese momento cuando declaró en el encuentro de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia: «Ya no hay nada nuevo por descubrir en la física. Lo único que queda es hacer mediciones cada vez más precisas». El físico estadounidense Albert Abraham Michelson estaba de acuerdo. También él pensó que el futuro de la ciencia consistiría simplemente en añadir unos cuantos decimales a los resultados ya obtenidos. «Las leyes y los hechos fundamentales más importantes de la ciencia física han sido todos descubiertos [...] nuestros descubrimientos futuros han de buscarse a partir del sexto decimal», dijo.

Cinco años más tarde Einstein anunció sus extraordinarias ideas nuevas sobre el espacio y el tiempo, seguidas de cerca por los descubrimientos de la física cuántica. Kelvin y Michelson no podían haber errado más al opinar sobre la cantidad de física nueva que quedaba por descubrir.

Lo que quiero tratar de explorar es si hay o no problemas de los que se pueda probar que quedarán siempre fuera del alcance de nuestros conocimientos, sean cuales sean las ideas nuevas con las que se aborden. Quizá no haya ninguno. Como científico, ésta es mi esperanza. Uno de los peligros al enfrentarse a los actuales problemas sin respuesta es rendirse demasiado pronto a su supuesta irresolubilidad. Pero, si existe lo incognoscible, ¿cuál es su condición? ¿Puede uno elegir entre diversas respuestas posibles, de modo que no importe por cuál de ellas optemos?

Hablar sobre lo que sabemos que no sabemos no es algo que esté reservado al mundo de la ciencia. El político estadounidense Donald Rumsfeld se adentró en la filosofía del conocimiento con unas famosas declaraciones:

Está lo conocido sabido; o sea, las cosas que sabemos que conocemos. También sabemos que está lo desconocido sabido; es decir, las cosas que sabemos que no conocemos. Pero también está lo desconocido no sabido, que son las cosas que no sabemos que desconocemos.

A Rumsfeld le llovieron los reproches a cuenta de esta respuesta críptica que dio a una pregunta que le hicieron durante una conferencia de prensa en el Departamento de Defensa sobre la falta de pruebas que relacionasen al gobierno de Iraq con las armas de destrucción masiva. Periodistas y blogueros se pusieron las botas, y todo ello culminó con la concesión a Rumsfeld, gracias a su galimatías, del premio *Foot in Mouth* («Bocazas») de la Campaña por un Inglés Claro. No obstante, si uno examina la declaración más de cerca, se da cuenta de que lo que hizo Rumsfeld fue resumir muy concisamente los distintos tipos de conocimiento. Sólo se le escapó quizá una categoría muy interesante: lo conocido no sabido. Las cosas que conocemos pero que no nos atrevemos a admitir que las sabemos. Como defiende el filósofo Slavoj Žižek, éstas

son posiblemente las más peligrosas. El mundo de los espejismos. Las ideas reprimidas. El subconsciente de Freud.

Me gustaría hablar aquí de lo desconocido no sabido, pero es que entonces ¡sabríamos de ello! Nassim Taleb, autor de *El cisne negro*, piensa que es la aparición inesperada justamente de lo desconocido no sabido la que produce los mayores cambios en la sociedad. Para Kelvin, la relatividad y la física cuántica resultaron ser los hechos desconocidos no sabidos que él fue incapaz de concebir. Así que lo más que puedo hacer en este libro es tratar de articular los hechos desconocidos sabidos y preguntarme si alguno de ellos seguirá siendo desconocido para siempre. ¿Existen cuestiones que por su propia naturaleza se quedarán eternamente sin respuesta, independientemente de los avances del conocimiento?

A estas cuestiones desconocidas las he llamado «fronteras». Representan el horizonte que acota nuestra visión. Mi viaje a las «fronteras» del conocimiento con el fin de articular lo que sabemos que no sabemos recorrerá lo que sabemos que sabemos, que pone de manifiesto cómo hemos logrado traspasar los que, según creíamos en su momento, eran los límites del conocimiento. Este viaje también pondrá a prueba mi propia capacidad de saber, porque cada vez es un desafío mayor para el científico incluso saber lo que se sabe.

Por más que este libro trate de lo que no podemos saber, es también importante comprender lo que sí que sabemos y cómo lo sabemos. Mi viaje a los límites del conocimiento me llevará por las tierras que los científicos ya han cartografiado, hasta los límites mismos de los avances rompedores de vanguardia. Sobre la marcha me detendré a examinar aquellos momentos en los que los científicos pensaron que se habían topado con un muro infranqueable, más allá del cual era imposible avanzar, para que al fin y a la postre la generación siguiente encontrara el camino, y esto nos proporcionará una importante perspectiva sobre aquellos problemas que hoy día consideramos incognoscibles. Espero que, al final de

nuestro viaje, este libro nos ofrezca una visión global no solamente de lo que no podemos saber, sino también de las cosas que sabemos.

A fin de que me ayuden en aquellas áreas de la ciencia que están fuera de mi zona de confort, he reclutado a expertos para orientarme al llegar a cada una de las «fronteras» de la ciencia y para comprobar si eran mis propias limitaciones, o más bien las limitaciones inherentes a las cuestiones tratadas, las que las hacían incognoscibles.

¿Qué pasa entonces si nos tropezamos con una pregunta que no admite respuesta? ¿Cómo se enfrenta uno al hecho de no poder saber? ¿He de asumir que algunas cosas estarán para siempre fuera de mi alcance? ¿Cómo asimilar como especie el hecho de no saber? Éste es un desafío que ha suscitado respuestas interesantes de la especie humana a lo largo de milenios, y notablemente la invención de una idea llamada Dios.

TRASCENDENCIA

Hay otro motivo que me ha llevado a investigar lo imposible de conocer y que está también vinculado a mi nuevo trabajo. El anterior titular de la cátedra para la Comprensión Pública de la Ciencia fue un tal Richard Dawkins. Cuando tomé posesión del puesto de manos de Dawkins, tuve que prepararme ante el presumible bombardeo de preguntas que sufriría, no sobre ciencia, sino sobre religión. La publicación de *El espejismo de Dios* y sus combativos debates con los creacionistas trajeron como consecuencia que, durante los últimos años que disfrutó de su puesto, Dawkins invirtiera mucho tiempo discutiendo sobre Dios y la religión.

Así que era inevitable que, al asumir yo la cátedra, muchos se interesaran por mi postura ante la religión. Mi reacción inicial fue marcar las distancias frente al debate sobre Dios. Mi tarea consistía en promover el progreso científico,

y en despertar la curiosidad del público sobre los avances de los que eran testigos. Estaba vivamente interesado en trasladar de nuevo el debate a cuestiones científicas y no religiosas.

Como estrategia para desviar las preguntas sobre Dios, admití llanamente que de hecho yo era una persona religiosa. Antes de que los periodistas se excitaran demasiado, me apresuré a añadir que mi religión es el Arsenal. Mi templo es el Emirates Stadium (antes lo era el Highbury Stadium), al norte de Londres, y todos los sábados voy a adorar a mis ídolos y a cantarles canciones. Y al comienzo de cada temporada confirmo mi fe en que ése será por fin el año en el que ganemos algún trofeo. En un entorno urbano como el de Londres, el fútbol ha asumido el papel que desempeñaba la religión en una sociedad, que consistía en estrechar los lazos dentro de la comunidad, al proporcionarle rituales que sus miembros pueden compartir.

En lo que a mí respecta, la ciencia que empecé a aprender cuando era adolescente hizo un buen trabajo a la hora de desterrar todos los pensamientos vagamente religiosos que había tenido en la niñez. Yo cantaba en el coro de la parroquia y eso me permitió descubrir las ideas que el cristianismo ofrecía para explicar el universo. La educación escolar en los años setenta en el Reino Unido estaba plagada de canciones con características ligeramente religiosas: interpretaciones del «All Things Bright and Beautiful» («Todas las cosas brillantes y hermosas») y del Padrenuestro en las reuniones escolares. La religión se presentaba como algo demasiado simplista como para sobrevivir ante las historias sofisticadas y poderosas que iba a aprender en los laboratorios de ciencia de la escuela secundaria. La religión fue pronto descartada. La ciencia... y el fútbol... eran mucho más atractivos.

Como era de esperar, con una respuesta tan poco seria no logré eludir las preguntas sobre mi postura ante la religión. Recuerdo que durante una entrevista radiofónica para la BBC un domingo por la mañana en Irlanda del Norte me

vi arrastrado sin quererlo a considerar la cuestión de la existencia de Dios. Supongo que debería haber atendido a las señales de alarma. Un domingo por la mañana, en el norte de Irlanda, Dios no anda muy lejos de la mente de muchos de los oyentes.

Como matemático, suelo enfrentarme al reto de probar la existencia de nuevas estructuras o de concebir argumentos que demuestren por qué esas estructuras no pueden existir. A lo largo de la historia, el poder del lenguaje matemático para producir argumentos lógicos ha llevado a algunos filósofos a recurrir a las matemáticas como método para demostrar la existencia de Dios. Pero dicho planteamiento a mí siempre me ha parecido problemático. En matemáticas, si uno pretende demostrar la existencia de un objeto, necesita una definición muy precisa de qué es lo que trata de probar que existe.

Así que, después de que el entrevistador intentara son-sacarme mi postura sobre la existencia de Dios, lo apremié para que tratara de definir qué significaba Dios para él, de modo que yo pudiera poner mi mente matemática a trabajar. «Es algo que trasciende la comprensión humana», dijo. Al principio pensé: qué manera de escurrir el bulto. Acababa de definirlo como algo que por su propia naturaleza es imposible de aprehender. Pero esta definición terminó por intrigarme. Al fin y al cabo, a lo mejor no era simplemente un modo de escabullirse.

Porque ¿qué pasaría si definiéramos a Dios como las cosas que no podemos conocer? En muchas culturas antiguas, los dioses eran siempre un comodín para aquello que no se podía explicar o comprender. Nuestros antepasados consideraron las erupciones o los eclipses tan misteriosos que los tomaban por acciones de los dioses. Cuando la ciencia ha explicado estos fenómenos, los dioses se han retirado.

Esta definición comparte algunos rasgos con un Dios que suele llamarse el «Dios de los vacíos». Esta expresión fue

usada por lo general de manera peyorativa por algunos pensadores religiosos que observaron que este Dios estaba sucumbiendo ante el embate del conocimiento científico, y se hizo un llamamiento para rechazar este tipo de dios. La expresión «Dios de los vacíos» fue acuñada por Charles Coulson, matemático en Oxford y dirigente de la Iglesia metodista, cuando afirmó: «No existe un “Dios de los vacíos” que tenga que hacerse cargo de los puntos estratégicos en los que falla la ciencia».

No obstante, esta expresión también se asocia a un argumento falaz de la existencia de Dios, que Richard Dawkins se encarga de refutar en *El espejismo de Dios*: si existen cosas que no podemos explicar o conocer, tiene que haber un Dios dedicado a llenar ese vacío. Pero más que la existencia de un Dios que llene el vacío, a mí me interesa identificar a Dios con la idea abstracta de las cosas que no podemos conocer. No me interesan tanto las cosas que ahora no sabemos como las que por su propia naturaleza nunca sabremos. Las cosas que siempre seguirán siendo trascendentes.

La religión es más compleja que el estereotipo simple que suele ofrecer la sociedad moderna. Para muchas culturas antiguas de la India, China u Oriente Medio, la religión no consistía en la adoración de una Inteligencia Sobrenatural, sino precisamente en el intento de reconocer los límites de nuestra comprensión y de nuestro lenguaje. Como dijo el teólogo Herbert McCabe: «Afirmar la existencia de Dios significa proclamar que existe una pregunta sin respuesta sobre el universo». La ciencia ha empujado con fuerza estos límites. Pero ¿quedará algo siempre pendiente? ¿Habrá siempre algo más allá de los límites? ¿Existe el Dios de McCabe?

Éstas son las preguntas que constituyen la esencia del presente libro. ¿Podemos identificar las cuestiones o los fenómenos físicos que se quedarán para siempre fuera del alcance de nuestro conocimiento? Si podemos identificar cosas que siempre estarán fuera del campo de nuestros conocimientos,

entonces ¿qué clase de Dios sería éste? ¿Qué poderes tendría un concepto así? ¿Las cosas que no nos es dado saber podrían actuar sobre el mundo e influir sobre nuestro futuro? ¿Merecen nuestra adoración?

No obstante, primero necesitamos saber si de hecho existe alguna cuestión sobre el universo que permanecerá siempre sin respuesta. ¿Existe realmente algo que no podamos saber?

PRIMERA FRONTERA:
LOS DADOS DE CASINO

Lo impredecible y lo predeterminado se despliegan juntos para hacer que las cosas sean lo que son. Así es como la naturaleza se crea a sí misma, a todas las escalas, desde el copo de nieve hasta la tormenta de nieve. Esto me llena de felicidad. Es como estar al principio otra vez, sin saber casi nada.

TOM STOPPARD, *Arcadia*

Tengo cerca de mí, sobre la mesa, un dado rojo suelto. Lo conseguí en un viaje que hice a Las Vegas. Me encapriché de él cuando lo vi sobre la mesa de juego. Estaba tan bien diseñado. Esas aristas tan precisas que confluían en un punto de las esquinas del cubo. Las caras estaban tan pulidas que era imposible descubrir por el tacto qué números figuraban en ellas. Los puntos se graban vaciando el dado y rellenando los huecos con una pintura que tiene exactamente la misma densidad que el plástico del que está hecho el dado. Con esto queda asegurado que la cara que representa el 6 no es un poquito más ligera que la cara opuesta, en la que figura un solo punto. La sensación que el dado transmite cuando se tiene en la mano es increíblemente satisfactoria. Es un objeto de una gran belleza.

Y sin embargo lo odio.

Ahora mismo su cara superior muestra tres puntos. Pero si lo cojo y lo dejo caer, no hay modo de saber cómo va a aterrizar. Es el símbolo rotundo de lo que es imposible saber. El futuro del dado parece ser cognoscible solamente cuando se convierte en pasado.

Siempre me ha incomodado sumamente que haya cosas que no pueda saber. Cosas a las que no pueda hincarles el

diente. No me importa no saber algo con tal de que haya a la postre alguna manera de calcular lo que está pasando. Con el tiempo suficiente. ¿Es este dado verdaderamente tan impredecible? ¿O podemos, con la información suficiente, deducir de hecho su próximo movimiento? Seguramente se trata solamente de aplicar las leyes de la física apropiadas y de resolver las ecuaciones matemáticas correspondientes. Seguramente esto es algo que podemos saber.

Mi disciplina, las matemáticas, se inventó para proporcionar a la gente la posibilidad de atisbar lo que está por venir. De mirar al futuro. De convertirse en dueños del destino, no en sus siervos. Yo creo que el universo funciona siguiendo unas leyes. Si uno entiende esas leyes, puede conocer el universo. El descubrir patrones ha significado para la especie humana un medio muy poderoso de tomar el control. Si existe un patrón, tenemos alguna posibilidad de predecir el futuro y de conocer lo incognoscible. El patrón del Sol significa que podemos fiarnos de que saldrá de nuevo mañana o de que habrá de nuevo luna llena después de 28 amaneceres. Así es como se desarrollaron las matemáticas. Las matemáticas son la ciencia de los patrones. El ser capaces de detectar patrones es una herramienta poderosa en la lucha por la supervivencia, descrita por la teoría de la evolución. Las cuevas de Lascaux muestran cómo al contar 13 cuartos de la Luna a partir de la primera salida invernal de las Pléyades se llega a una etapa del año en la que las yeguas están preñadas y se dejan cazar fácilmente. El ser capaz de predecir el futuro es la clave de la supervivencia.

Pero hay algunas cosas que parecen carecer de patrones o que poseen patrones tan complejos u ocultos que están fuera de la comprensión humana. Una tirada concreta del dado no es como la salida del Sol. Parece que no hay modo de saber cuál de las seis caras del dado quedará boca arriba cuando éste finalmente se detenga. Por eso se ha usado el dado desde antiguo para decidir disputas, competir en los juegos o apostar dinero.

Este bello cubo rojo, con sus puntos blancos, ¿es realmente impredecible? Ciertamente, no soy el primero que ha vivido una relación compleja con el comportamiento de este cubo.

CONOCER EL DESEO DE LOS DIOS

En un viaje reciente a Israel, llevé a mis hijos a un yacimiento arqueológico que hay en el parque nacional Beit Guvrin. El paraje era tan popular en tiempos antiguos que el yacimiento consiste en capa tras capa de ciudades construidas unas encima de otras. Hay tantos restos en el terreno que los arqueólogos están encantados de reclutar a aficionados, como mis hijos y yo, para echar una mano en las excavaciones, aunque se pueda romper alguna que otra vasija sobre la marcha. Como estaba previsto, desenterramos montones de fragmentos de porcelana, así como un gran número de huesecillos de animales. Pensamos que serían los restos de la cena, pero el guía nos explicó que en realidad eran las versiones más primitivas de los dados.

Algunas excavaciones arqueológicas de asentamientos que datan del Neolítico han puesto al descubierto una proporción exageradamente alta de huesos de talón de ovejas u otros animales, entre las vasijas hechas añicos y los pedernales que se encuentran habitualmente en los lugares que fueron habitados por humanos. Estos huesos son de hecho antepasados de mi dado de casino. Cuando se lanzan al aire, aterrizan con naturalidad sobre una de sus cuatro caras. Muchas veces llevan letras o números grabados. Se piensa que, más que para jugar, estos dados primitivos se usaban con fines adivinatorios. Y esa conexión entre el resultado de la tirada de un dado y la voluntad de los dioses ha perdurado durante siglos. Se creía que el saber cómo aterrizará el dado era algo que trascendía la comprensión humana. El resultado estaba en manos de los dioses.

Poco a poco estos dados fueron asumiendo un papel más prosaico dentro de la esfera de nuestro ocio. El primer dado

en forma de cubo, como el que tengo en mi mesa, se descubrió cerca de Harappa, lo que ahora es el norte de Paquistán, lugar en el que se desarrolló una de las primeras civilizaciones urbanas, y se remonta al tercer milenio antes de Cristo. Al mismo tiempo, se han encontrado dados piramidales de cuatro caras que forman parte de un juego que se descubrió en la ciudad de Ur, en la antigua Mesopotamia.

Los romanos y los griegos fueron adictos a los juegos de dados, y también los soldados de la Edad Media que volvieron de las Cruzadas con un nuevo juego que se llamaba azar, término que proviene de *al-zahr*, palabra árabe que significa 'dado'. Era una versión primitiva del juego de dados que se practica ahora en los casinos, como el de Las Vegas en el que conseguí mi dado.

Si se pudiera predecir el comportamiento de los dados, ninguno de los juegos que dependen de él hubiera arraigado. La emoción del backgammon, del azar o del juego de dados proviene de no saber cómo caerán los dados. Así que seguramente los jugadores no me van a agradecer el intento de predecir el comportamiento de mi dado.

Durante siglos, nadie pensó siquiera que esta proeza fuera posible. Los antiguos griegos, que fueron de los primeros en desarrollar las matemáticas como una herramienta para gobernar su entorno, ciertamente no supieron nunca cómo afrontar este problema de dinámica. Sus matemáticas eran un mundo estático y rígido de geometría, incapaz de hacer frente a un dado que rebota por el suelo. Pudieron proporcionar fórmulas que describían el contorno geométrico del cubo, pero una vez que el dado empezaba a moverse, se perdían.

¿No sería razonable realizar experimentos para hacerse una idea de los resultados? La actitud antiempírica de los antiguos griegos significa que no encontraron motivos para analizar los datos y tratar de desarrollar una ciencia que predijera cómo aterrizarían los dados. Al fin y al cabo, la manera en que caen los dados una vez no tiene ninguna influen-

cia en el resultado de la siguiente tirada. Era algo aleatorio, y para los antiguos griegos eso significaba que era inaccesible al conocimiento.

Aristóteles pensaba que los sucesos del mundo podían clasificarse esencialmente en tres categorías: los «sucesos seguros», que ocurren necesariamente siguiendo las leyes de la naturaleza; los «sucesos probables», que ocurren la mayor parte de las veces, pero que pueden admitir algunas excepciones; y finalmente los «sucesos inaccesibles al conocimiento», que ocurrían por puro azar. Aristóteles colocó sin duda alguna mi dado en esta última categoría.

Cuando la filosofía se vio influenciada por la teología cristiana, las cosas empeoraron. Como el resultado de la tirada de los dados estaba en manos de Dios, se trataba de algo que los humanos no podían aspirar a saber. Como dijo san Agustín: «Afirmamos que no es que no existan esas causas que supuestamente obedecen al azar, sino que están ocultas, y nosotros las atribuimos a la voluntad de Dios».

No había opción. Ni libre albedrío. Lo imposible de conocer era conocido por Dios, que determinaba el resultado de los dados. Cualquier intento de tratar de predecir el resultado de la tirada era obra de un hereje, de alguien que osaba pensar que podía conocer la mente de Dios. El rey Luis XI de Francia llegó al extremo de prohibir la fabricación de dados porque pensaba que los juegos de azar eran impíos. Pero los dados, como el que tengo sobre mi mesa, comenzaron finalmente a compartir sus secretos. Hubo que esperar hasta el siglo XVI para arrebatarse los dados de las manos de Dios y poner su destino en las manos de los hombres, y en sus mentes.

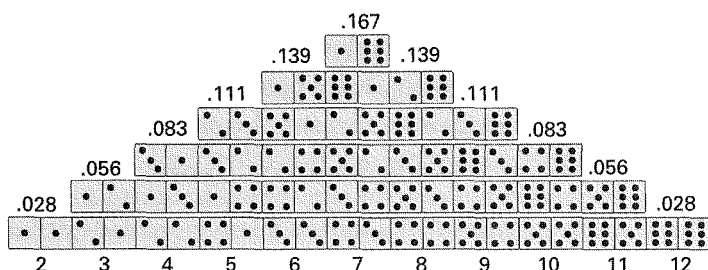
AVERIGUAR LOS NÚMEROS DE LOS DADOS

Tengo ahora otros dos dados junto a mi precioso dado de Las Vegas. Aquí va una pregunta: si lanzo los tres dados, ¿es preferible apostar a que salga una puntuación de 9 o una pun-

tuación de 10? Antes del siglo XVI no había ninguna herramienta disponible para responder a una pregunta así. Y sin embargo, cualquiera que hubiese jugado durante bastante tiempo sabría que si lanzáramos solamente dos dados sería mejor apostar por el 9 que por el 10. Al fin y al cabo, la experiencia acaba por decirle a uno que, de media, el 9 sale un tercio de veces más que el 10. Pero con tres dados es más difícil hacerse una idea de a qué número es mejor apostar, porque parece que 9 y 10 salen con la misma frecuencia. Pero ¿es esto cierto?

En Italia, a principios del siglo XVI, un jugador empedernido llamado Girolamo Cardano fue el primero en darse cuenta de que al lanzar un dado existían patrones que se podían aprovechar. No eran patrones utilizables para una tirada suelta del dado; más bien surgían a largo plazo. Un jugador como Cardano, que pasaba muchas horas tirando los dados, podría usar esos patrones en beneficio propio. Tenía tal adicción al ejercicio de predecir lo inalcanzable que una vez llegó a vender las propiedades de su mujer con el fin de conseguir fondos para mantener sus apuestas mínimas en la mesa de juego.

Cardano tuvo la ingeniosa idea de contar los diferentes escenarios futuros que podrían presentar los dados. Si arrojamus dos dados, hay 36 escenarios futuros diferentes. Están descritos en el siguiente diagrama.



Solamente en tres de ellos el total de puntos es 10, mientras que el total es 9 en cuatro de ellos. De modo que Cardano argumentó que, en el caso de que se lancen dos dados, tiene más sentido apostar al 9 que apostar al 10. Esto no resultaba de ninguna ayuda en una tirada suelta, pero a la larga significaba que Cardano, de haberse atendido a las matemáticas, habría resultado vencedor. Por desgracia, era más disciplinado como matemático que como jugador. Consiguió perder todo lo que heredó de su padre y acababa enredado en reyertas a cuchillo con sus oponentes cuando los dados no le sonreían.

Sin embargo, estaba decidido a conseguir que una de sus profecías resultara correcta. Al parecer había profetizado el día de su muerte: 21 de septiembre de 1576. Para asegurarse de que su apuesta era la correcta, decidió ocuparse personalmente del asunto. Se suicidó al llegar el día señalado. Pese a mi anhelo de conocimiento, creo que esto es ir demasiado lejos. Realmente, la posibilidad de conocer la fecha de nuestra muerte es algo que la mayoría optaría por descartar muy a gusto. Pero Cardano se mostró decidido a ganar, a pesar de estar jugando a los dados con la muerte.

Antes de quitarse la vida, escribió el que muchos consideran el primer libro que abordó el problema de predecir el comportamiento de los dados cuando éstos ruedan sobre la mesa. Aunque fue escrito hacia 1564, el *Liber de ludo aleae* no vio la luz hasta que fue finalmente publicado en 1663.

De hecho, fue el gran físico italiano Galileo Galilei quien aplicó el mismo análisis que Cardano había descrito para decidir si es mejor apostar a una puntuación de 9 o de 10 cuando se lanzan tres dados. Razonó que existen $6 \times 6 \times 6 = 216$ escenarios futuros posibles para los dados. Entre éstos, 25 dan un 9, mientras que 27 dan un 10. No es una gran diferencia, difícil además de detectar a partir de datos empíricos, pero sí suficiente para que apostar al 10 acabe dando cierta ventaja a la larga.

UN JUEGO INTERRUPTIDO

El control matemático de los dados pasó de Italia a Francia a mediados del siglo XVII cuando dos grandes primeras espadas, Blaise Pascal y Pierre de Fermat, empezaron a concentrar sus mentes en predecir el futuro de estos dados saltarines. Pascal se interesó en tratar de entender las tiradas de los dados cuando conoció a uno de los grandes jugadores de su tiempo, el caballero de Méré. Éste había retado a Pascal con una serie de interesantes situaciones. Una de ellas era el problema que Galileo había resuelto. Pero entre las otras estaba el problema de saber si era aconsejable apostar a que saldrá por lo menos un 6 al lanzar cuatro veces un dado, y también el problema, ahora famoso, de los «puntos».

Pascal inició una animada correspondencia con el gran matemático y magistrado Pierre de Fermat en la que ambos trataron de resolver los problemas propuestos por de Méré. Al lanzar cuatro dados, puede uno considerar los $6 \times 6 \times 6 \times 6 = 1.296$ resultados diferentes y contar cuántos de ellos incluyen un 6, pero esto resulta un poco laborioso.

En vez de hacer esto, Pascal razonó que la posibilidad de que salga un 6 en una tirada es de $5/6$. Como cada tirada es independiente, esto significa que hay una posibilidad de $5/6 \times 5/6 \times 5/6 \times 5/6 = 48,2\%$ de no conseguir ningún 6 en cuatro tiradas. Lo cual implica que hay un $51,8\%$ de posibilidades de obtener un 6. Un poco más de la mitad de las veces, con lo cual es ventajoso apostar.

El problema de los «puntos» era todavía más desafiante. Supongamos que dos jugadores—llamémosles Fermat y Pascal—lanzan un dado. Fermat gana un punto si el dado cae mostrando un 4 o más; en el caso contrario, Pascal es el que gana un punto. De modo que ambos tienen una posibilidad de 50:50 de ganar un punto en cada tirada del dado. Han apostado 64 libras, que irán a parar al primero que consiga 3 puntos. Sin embargo, cuando Fermat llevaba ganados 2 puntos y Pascal 1, el juego queda interrumpido.

pido y no pueden seguir jugando. ¿Cómo deberían repartirse las 64 libras?

Los intentos tradicionales de resolver el problema se basaron en lo ocurrido en el pasado. Quizá, al haber ganado Fermat el doble de rondas que Pascal, debería llevarse el doble de premio. Pero esto no tendría sentido si, por ejemplo, Fermat hubiera ganado una ronda y Pascal ninguna antes de interrumpirse el juego, ya que en este caso Pascal no se llevaría nada, cuando todavía le quedaban posibilidades de ganar. Después de reflexionar profundamente, Niccolò Fontana Tartaglia, contemporáneo de Cardano, creyó que el problema no tenía solución: «La resolución de esta cuestión es judicial más que matemática, de modo que se haga como se haga el reparto, éste dará lugar a litigios».

Hubo otros que no se rindieron tan fácilmente. Prestaron atención no a lo que ocurrió en el pasado, sino a lo que podría ocurrir en el futuro. Al contrario que en los otros problemas, no se trata de predecir el resultado del dado, sino de imaginar las distintas situaciones futuras y de repartir el botín con arreglo a cuáles de ellas favorecen a uno u otro jugador.

Es fácil engañarse en este punto. Parece que pueden darse tres situaciones: Fermat gana la siguiente ronda y se embolsa las 64 libras; Pascal gana la siguiente ronda, con lo que solamente queda la última ronda, en la cual puede ganar Pascal o Fermat; y Fermat gana en dos de estas tres situaciones posibles, así que seguramente debería recibir dos tercios de las ganancias. Ésta fue la trampa en la que cayó de Méré. Pascal argumenta que esta solución es incorrecta: «El caballero de Méré posee un gran talento pero no es matemático; y esto es, como ya sabe, un gran fallo». ¡Un gran fallo, ciertamente!

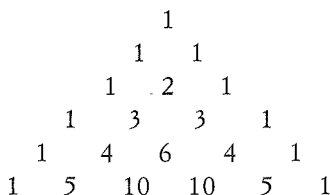
Pascal, por el contrario, sí era competente en matemáticas, y argumentó que las ganancias deberían repartirse de otro modo. Hay una posibilidad de 50:50 de que Fermat gane la siguiente ronda, en cuyo caso consigue 64 libras. Pero si es Pascal quien la gana, entonces ambos tienen las mismas posi-

bilidades de ganar la última ronda, con lo cual deberían llevarse 32 libras cada uno. En ambos casos Fermat tiene derecho al menos a 32 libras. De modo que las otras 32 han de repartirse equitativamente, y habrá que dar 48 libras en total a Fermat.

Desde su casa en las cercanías de Toulouse, Fermat escribió para mostrar su acuerdo con el análisis de Pascal: «Veo con claridad que la verdad es la misma en Toulouse y en París».

LA APUESTA DE PASCAL

El análisis de los puntos de Pascal y Fermat podía aplicarse a situaciones mucho más complejas. Pascal descubrió que el secreto de decidir cómo dividir las ganancias se encuentra oculto en un diagrama que ahora se conoce como triángulo de Pascal.



El triángulo se construye de modo que cada número es la suma de los dos números que se encuentran justamente encima de él. Los números que se obtienen así son la clave para dividir las ganancias en cualquier juego de puntos que quede interrumpido. Por ejemplo, si Fermat necesita 2 puntos para ganar y Pascal necesita 4, consultamos la fila número $2 + 4 = 6$ del triángulo y sumamos los cuatro primeros números por un lado y los dos últimos por otro. Así sale la proporción con arreglo a la cual hay que dividir las ganancias. En este caso, la proporción es de $1 + 5 + 10 + 10 = 26$ a $1 + 5 = 6$. De modo que Fermat consigue $26/32 \times 64 = 52$ libras y Pascal se lleva

$6/32 \times 64 = 12$ libras. En general, un juego en el que Fermat necesita n puntos y Pascal m puntos, se resuelve consultando la fila número $n + m$ del triángulo de Pascal.

Hay pruebas de que a los franceses se les adelantaron varios miles de años en el descubrimiento de que este triángulo tiene mucho que ver con los resultados de los juegos de azar. Los chinos eran usuarios habituales de los dados y de otros métodos aleatorios como el *I Ching* para tratar de predecir el futuro. El texto del *I Ching* tiene unos tres mil años de antigüedad y contiene precisamente la misma tabla que Pascal diseñó para analizar los resultados del lanzamiento de dados, pero en su caso para determinar la selección aleatoria de un hexagrama que pasaría luego a ser examinado para descubrir su significado. Pero hoy día el triángulo ha quedado atribuido a Pascal y no a los chinos.

Pascal no sólo se interesaba por los dados. Es famoso cómo aplicó su nueva teoría matemática de las probabilidades a uno de los grandes enigmas: la existencia de Dios.

«Dios o es, o no es». ¿Hacia qué lado nos inclinaremos? La razón no puede determinarlo: hay un caos infinito que nos separa. En la extremidad de esta distancia infinita se está jugando un juego en el que saldrá cara o cruz [...] ¿Por cuál os decidiréis, pues? Veamos. Puesto que hay que elegir, veamos qué es lo que nos interesa menos. Tenéis dos cosas que perder: la verdad y el bien, y dos cosas que comprometer: vuestra razón y vuestra voluntad, vuestro conocimiento y vuestra felicidad; y vuestra naturaleza tiene dos cosas de que huir: el error y la miseria. Vuestra razón no queda más herida al elegir lo uno que lo otro, puesto que, necesariamente, hay que elegir [...] Pero ¿vuestra felicidad? Pesemos la ganancia y la pérdida, tomando como cruz que Dios existe [...] si ganáis, ganáis todo; si perdéis, no perdéis nada. Optad, pues, por que exista sin vacilar.

Este argumento se conoce como la apuesta de Pascal. Él defendía que la recompensa es mucho mayor si uno apuesta por creer en la existencia de Dios. En este caso, uno pierde

poco si se equivoca y gana la vida eterna si acierta. En caso contrario, si uno apuesta contra la existencia de Dios y pierde, el resultado es la condena eterna, y si gana, la única recompensa es saber que Dios no existe. El argumento se hace añicos si la probabilidad de que Dios exista es de hecho 0, e incluso si no lo es, quizá el coste de creer es demasiado elevado cuando se confronta con la probabilidad de que Dios exista.

Las técnicas probabilísticas desarrolladas por matemáticos como Fermat y Pascal para hacer frente a la incertidumbre eran increíblemente potentes. Fenómenos considerados hasta entonces inaccesibles al conocimiento, la expresión de los dioses, empezaban a estar al alcance de la mente de los hombres. Hoy estos métodos probabilísticos son nuestra mejor arma para explorarlo todo, desde el comportamiento de las partículas de un gas hasta las subidas y bajadas de la Bolsa. A decir verdad, la misma naturaleza íntima de la materia parece estar a merced de las leyes matemáticas de la probabilidad, como descubriremos en la tercera «frontera», cuando apliquemos la física cuántica para predecir lo que van a hacer las partículas fundamentales cuando las observemos. Pero para alguien que busca certezas, estos métodos probabilísticos representan un compromiso frustrante.

Ciertamente, aprecio el gran progreso intelectual que Fermat, Pascal y otros consiguieron, pero a mí no me ayuda a saber cuántos puntos mostrará el dado si lo lanzo. Por más que he profundizado en el estudio de la teoría de las probabilidades, siempre me ha dejado un poso de insatisfacción. Si hay algo que se inculca en cualquier curso de teoría de la probabilidad es que no importa cuántas veces seguidas haya salido el 6, que eso no influye en el comportamiento del dado en la siguiente tirada.

Pero entonces, ¿hay algún modo de saber cómo va a caer el dado? ¿O este conocimiento será siempre inaccesible? La respuesta es no, según las revelaciones de un científico de este lado de las aguas del Canal, en Inglaterra.

Isaac Newton es mi ídolo permanente en la lucha contra el saber inalcanzable. La idea de que quizá un día podríamos saber todo sobre el universo tiene su origen en la obra revolucionaria de Newton *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Publicada por primera vez en 1687, está consagrada a desarrollar un nuevo lenguaje matemático que prometía proporcionar las herramientas precisas para desentrañar cómo funciona el universo. Era un modelo radicalmente nuevo de cómo hacer ciencia. La obra «arrojó la luz de las matemáticas sobre una ciencia que hasta entonces había permanecido en las sombras de las conjeturas y de las hipótesis», como dijo el físico francés Alexis Clairaut en 1747.

Es también una tentativa de unificar, de crear una teoría que describa lo celestial y lo terrenal, lo grande y lo pequeño. Kepler había concebido leyes que describían los movimientos de los planetas, desarrolladas empíricamente atendiendo a los datos y tratando de ajustar las ecuaciones para crear el pasado. Galileo había descrito la trayectoria de una bola que vuela en el aire. Sin embargo, fue el genio de Newton el que comprendió que estas situaciones eran todas ejemplos de un mismo fenómeno: la gravedad.

Nacido el día de Navidad de 1643 en la ciudad de Woolsthorpe, en el condado de Lincoln, Newton siempre trató de dominar el mundo físico. Diseñó relojes mecánicos y de sol, construyó molinos en miniatura movidos por ratones, esbozó innumerables planos para edificios y barcos, y dibujó minuciosas ilustraciones de animales. Por lo visto, el gato de la casa desapareció un día, arrastrado por un globo de aire caliente que había fabricado Newton. Sin embargo, los informes del colegio no presagiaban un gran futuro para él, ya que lo describían como «distráido y perezoso».

La pereza no es necesariamente un atributo tan malo en un matemático. Puede ser un poderoso incentivo para buscar algún atajo ingenioso con el que resolver un problema, en vez

de confiar en el trabajo duro. Pero por lo general no es una cualidad que aprecien mucho los profesores.

En realidad, a Newton le iba tan mal en el colegio que su madre decidió que aquello era una pérdida de tiempo y que más valía que su hijo aprendiera a administrar la granja familiar de Woolsthorpe. Por desgracia, Newton se mostró igualmente inútil a la hora de gestionar las propiedades familiares, de modo que fue enviado de nuevo al colegio. Aunque seguramente es apócrifa, circula una historia que cuenta que la súbita transformación académica de Newton coincidió con un golpe en la cabeza que le propinó el niño más bruto del colegio. Sea o no cierta dicha historia, el caso es que tras esta transformación académica empezó a destacar en el colegio, y acabó trasladándose a estudiar a la universidad de Cambridge.

Cuando la plaga de peste bubónica se extendió por Inglaterra en 1665, la universidad de Cambridge se cerró por precaución. Newton se retiró a su casa de Woolsthorpe. La soledad es a veces un factor importante a la hora de concebir ideas nuevas. Newton se recluía en su habitación y pensaba.

La verdad es hija del silencio y de la meditación. Mantengo la materia constantemente ante mí y espero hasta que aparecen lentamente los primeros rayos de luz, que se convierten poco a poco en una luz plena y clara.

En la soledad del condado de Lincoln, Newton creó un nuevo lenguaje capaz de captar el problema de un mundo siempre fluctuante: el cálculo infinitesimal. Esta herramienta matemática sería la clave para saber por adelantado cómo actuará el universo. Este lenguaje es el que me da alguna esperanza de averiguar cómo podría aterrizar el dado de casino.

El cálculo infinitesimal trata de dar un sentido a lo que a simple vista parece una operación absurda: dividir cero entre cero. Al soltar el dado, es esta operación la que debo realizar si quiero comprender la velocidad instantánea del dado mientras vuela por el aire.

La velocidad del dado aumenta constantemente, ya que la gravedad lo atrae hacia el suelo. ¿Cómo podemos calcular entonces la velocidad en un instante determinado? Por ejemplo, ¿a qué velocidad cae el dado pasado un segundo? La velocidad es el espacio recorrido entre el tiempo transcurrido. De modo que podríamos registrar la distancia que recorre en el siguiente segundo y eso nos daría una media de la velocidad durante ese período de tiempo. Pero queremos saber la velocidad exacta. Podríamos registrar la distancia recorrida durante un período más corto de tiempo, por ejemplo medio segundo o un cuarto de segundo. Cuanto más corto sea el período de tiempo, más precisamente estaremos calculando la velocidad. En última instancia, para conseguir la velocidad exacta queremos tomar un intervalo de tiempo infinitamente pequeño. Pero esto nos lleva a calcular cero dividido entre cero.

CÁLCULO INFINITESIMAL:

DAR UN SENTIDO A CERO DIVIDIDO ENTRE CERO

Supongamos que un coche arranca de una posición de reposo. Cuando el cronómetro echa a andar, el conductor pisa a fondo el acelerador. Supongamos que hemos determinado que después de t segundos el conductor ha cubierto $t \times t$ metros. ¿A qué velocidad irá el coche después de 10 segundos? Obtenemos una aproximación de la velocidad mirando qué distancia ha recorrido el coche entre los 10 y los 11 segundos. La velocidad media en este in-

intervalo de tiempo ha sido $(11 \times 11 - 10 \times 10)/1 = 21$ metros por segundo.

Pero si miramos en un intervalo de tiempo más corto, por ejemplo, si miramos la velocidad media en 0,5 segundos, obtenemos:

$$(10,5 \times 10,5 - 10 \times 10)/0,5 = 20,5 \text{ metros por segundo.}$$

Algo más lento que antes, por supuesto, porque el coche está acelerando, de modo que de media va a estar moviéndose más deprisa en el segundo medio segundo del segundo que va del décimo al undécimo. Pero consideremos ahora un período todavía más breve, por ejemplo, 0,25 segundos:

$$(10,25 \times 10,25 - 10 \times 10)/0,25 = 20,25 \text{ metros por segundo.}$$

Seguramente el matemático que el lector lleva dentro habrá descubierto el patrón. Si consideramos un período de tiempo de x segundos, la velocidad media en este período será $20 + x$ metros por segundo. La velocidad, al ir tomando períodos de tiempo cada vez más cortos, se acerca cada vez más a los 20 metros por segundo. Así, aunque para calcular la velocidad exactamente a los 10 segundos parezca que tenemos que plantearnos la determinación de $0/0$, el cálculo infinitesimal da un sentido preciso a lo que significa esto.

El cálculo de Newton daba un sentido a esta operación. Newton comprendió cómo calcular hacia qué valor tendía la velocidad al ir acortando el intervalo de tiempo. Fue un lenguaje nuevo y revolucionario que consiguió captar un mundo cambiante y dinámico. La geometría de los antiguos griegos resultaba perfecta para una descripción estática y congelada del mundo. El invento matemático de Newton era un lenguaje que podía describir un mundo en movimiento. Las matemáticas habían pasado de describir la vida detenida a captar una imagen en movimiento de la misma. Era el equivalente científico a lo que supuso pasar, en este mismo perío-

do, del arte estático del Renacimiento a la explosión del arte dinámico del Barroco.

Newton consideraba esta etapa como una de las más productivas de su vida, y la llamaba su *annus mirabilis*. «Estaba en la mejor edad para la invención y me concentré en las matemáticas y en la filosofía como nunca haría».

Todo lo que nos rodea fluctúa, por lo que no es ninguna sorpresa que este tipo de matemáticas fuera tan influyente. Pero para Newton el cálculo era una herramienta personal que lo ayudó a alcanzar las conclusiones científicas que recogió en los *Principia*, el gran tratado publicado en 1687 que describe sus ideas sobre la gravedad y las leyes del movimiento.

Escribiendo en tercera persona, explica que su cálculo es la clave de los descubrimientos científicos contenidos en el texto: «Con ayuda de este nuevo Análisis, el señor Newton descubrió la mayor parte de las proposiciones de los *Principia*». Sin embargo, no publica ningún balance de este nuevo análisis; en vez de eso, hace circular sus ideas en privado, entre los amigos, ideas que a él no le urgía publicar para que otros pudieran valorarlas.

Por fortuna, este lenguaje está hoy al alcance de todos. Es uno de los que aprendí a lo largo de mis años de formación como matemático. Pero para intentar comprender los dados, necesitaremos combinar este descubrimiento matemático de Newton con su gran contribución a la física: las famosas leyes del movimiento con las que abre sus *Principia*.

LAS REGLAS DEL JUEGO

Newton explica en los *Principia* tres sencillas leyes a partir de las cuales se desarrolla la mayor parte de la dinámica del universo.

Primera ley del movimiento de Newton: *Un cuerpo permanecerá en estado de reposo o se moverá en línea recta a velo-*

cidad constante mientras ninguna fuerza le obligue a cambiar de estado al actuar sobre él.

Esto no era tan obvio para científicos del estilo de Aristóteles. Si lanzamos rodando un balón sobre una superficie plana, éste se acaba parando. Parece que se necesita una fuerza para mantenerlo en movimiento. Existe, sin embargo, una fuerza oculta que cambia su velocidad: la fricción. Si lanzo el dado en el espacio exterior, lejos de cualquier campo gravitatorio, seguirá ciertamente volando en línea recta a velocidad constante.

Para cambiar la velocidad o la dirección en el movimiento de un objeto, se necesita una fuerza. La segunda ley de Newton explicaba cómo esa fuerza cambia el movimiento, y entrañaba la nueva herramienta que había desarrollado para expresar los cambios. El cálculo ya nos ha permitido articular a qué velocidad va el dado en cada momento, según cae aceleradamente hacia la mesa. El ritmo de cambio de esa velocidad se obtiene aplicando de nuevo el cálculo. La segunda ley de Newton dice que hay una relación directa entre la fuerza que se aplica y el ritmo de cambio de la velocidad.

Segunda ley del movimiento de Newton: *El ritmo de cambio de la velocidad, o aceleración, de un objeto es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa.*

Para entender el movimiento de los cuerpos, como el de mi dado rodante, necesitamos comprender las posibles fuerzas que actúan sobre ellos. La ley de la atracción universal de Newton identificaba una de las fuerzas principales que ejercían su efecto, por ejemplo, sobre la manzana que cae del árbol o sobre los planetas que se mueven por el sistema solar. La ley afirma que la fuerza que ejerce sobre un cuerpo de masa m_1 otro cuerpo de masa m_2 que está a una distancia r de aquél es igual a

$$G \times m_1 \times m_2 / r^2$$

donde G es una constante física empírica que controla la intensidad de la gravedad en nuestro universo.

Con estas leyes ya se puede describir la trayectoria de una pelota que viaja por el aire, o de un planeta que se mueve por el sistema solar, o del dado que ha soltado mi mano. Pero el siguiente problema aparece cuando el dado golpea la mesa. ¿Qué pasa entonces? Newton tiene una tercera ley que nos da una pista.

Tercera ley del movimiento de Newton: *Cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, el segundo ejerce simultáneamente una fuerza de la misma intensidad y de sentido opuesto sobre el primero.*

El propio Newton utilizó estas leyes para deducir una cadena extraordinaria de resultados sobre el sistema solar. Como escribió: «Voy a mostrar ahora el sistema del mundo». Para aplicar sus ideas a la trayectoria de los planetas empezó por reducir cada planeta a un punto situado en su centro de masas y suponer que toda la masa del planeta se encontraba concentrada en ese punto. Entonces, aplicando sus leyes del movimiento y sus nuevas teorías matemáticas, dedujo las leyes de Kepler del movimiento planetario.

También fue capaz de calcular las masas relativas de los grandes planetas, de la Tierra y del Sol. Y explicar algunas de las curiosas irregularidades que se producen en el movimiento de la Luna por influencia del Sol. Asimismo, dedujo que la Tierra no podría ser una esfera perfecta, sino que debería estar algo aplastada en los polos, debido a la fuerza centrífuga ejercida por la rotación de la Tierra. Los franceses pensaban sin embargo que debería ocurrir lo contrario: que la Tierra debería ser algo puntiaguda en la dirección de los polos. Una expedición realizada en 1733 probó que Newton y las matemáticas tenían razón.

Fue una hazaña extraordinaria. Las tres leyes eran las semillas a partir de las cuales podrían deducirse en principio los movimientos de todas las partículas del universo. Merecía llamarse Teoría del Todo. Digo «semillas» porque fue preciso que otros científicos hicieran germinar estas semillas para poderlas aplicar a situaciones más complejas que el sistema solar de Newton, consistente en cuerpos de masa puntual. Por ejemplo, en su forma original, las leyes no resultan adecuadas para describir el movimiento de cuerpos menos rígidos, o de cuerpos que pueden deformarse. A Leonhard Euler, gran matemático suizo que vivió en el siglo XVIII, se deben las ecuaciones que generalizaban las leyes de Newton. Las ecuaciones de Euler podían aplicarse más generalmente a cosas como una cuerda vibrante o un péndulo en marcha.

Con el tiempo fueron surgiendo más y más ecuaciones para controlar diversos fenómenos naturales. Euler ideó ecuaciones para fluidos no viscosos. A principios del siglo XIX, el matemático francés Joseph Fourier concibió ecuaciones que describen el flujo del calor. Sus compatriotas Pierre-Simon Laplace y Siméon-Denis Poisson partieron de las ecuaciones de Newton para elaborar ecuaciones más generales para la gravitación, que luego se vio que también servían para controlar otros fenómenos como la hidrodinámica y la electrostática. El comportamiento de los fluidos viscosos fue descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, y el electromagnetismo, por las ecuaciones de Maxwell.

Con el descubrimiento del cálculo infinitesimal y de las leyes del movimiento, parecía que Newton había convertido el universo en un artefacto mecánico controlado por ecuaciones matemáticas. Los científicos pensaron que había descubierto verdaderamente la Teoría del Todo. En su *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, publicado en 1812, el matemático Pierre-Simon Laplace resumió la creencia de la mayoría

de los científicos en el poder extraordinario de las matemáticas para explicarnos por entero el universo físico.

Hemos de considerar el estado actual del universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que ha de seguirle. Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos.

La opinión de que, en teoría, tanto el pasado como el futuro del universo eran accesibles al conocimiento llegó a ser dominante entre los científicos de los siglos que siguieron a la gran obra de Newton. Parecía que todas las ideas de que Dios actuaba sobre el mundo habían sido descartadas. Dios podría ser el responsable de poner las cosas en marcha, pero a partir de ese momento tomaban las riendas las ecuaciones de las matemáticas y de la física.

¿Qué hay entonces de mi humilde dado? Seguramente, con las leyes del movimiento a mano, no habrá más que combinar la geometría del cubo con la dirección inicial del movimiento y las interacciones subsiguientes con la mesa para predecir el resultado, ¿cierto? He escrito las ecuaciones en mi libreta y parecen bastante intimidatorias.

Newton consideró también el problema de intentar predecir el comportamiento de los dados. El interés de Newton se despertó con motivo de una carta que le envió Samuel Pepys en la que éste le solicitaba consejo sobre cuál era la mejor opción en una apuesta que estaba a punto de cerrar con un amigo:

- (1) Sacar al menos un 6 al arrojar seis dados.
- (2) Sacar al menos dos 6 al arrojar doce dados.
- (3) Sacar al menos tres 6 al arrojar dieciocho dados.

Pepys iba a jugarse 10 libras, el equivalente a 1.000 libras de hoy, así que le interesaba recibir un buen consejo. La intuición de Pepys le decía que la opción más probable era la (3), pero Newton le contestó que según las matemáticas lo cierto era justo lo contrario. Debería invertir su dinero en la primera opción. Sin embargo, Newton no recurrió a sus leyes del movimiento ni a su cálculo para resolver el problema, sino a las ideas que habían desarrollado Fermat y Pascal.

No obstante, aunque Newton hubiera podido resolver las ecuaciones que he anotado en mi libreta para describir el movimiento del dado, resulta que había otro problema capaz de frustrar toda posibilidad de conocer el futuro de mi dado. A pesar de que Pascal estaba hablando de su apuesta con Dios, hay una línea muy interesante en su análisis en la que cercena la esperanza de conocer el futuro: «La razón no puede determinarlo: hay un caos infinito que nos separa».

EL DESTINO DEL SISTEMA SOLAR

Si Newton es el héroe, el matemático francés Henri Poincaré tendría que ser el villano en mi iniciativa por predecir el futuro. Y sin embargo, difícilmente puedo culparle de haber desvelado uno de los golpes más devastadores que puede recibir quien desee saber lo que va a ocurrir en un futuro. Tampoco él estaba muy entusiasmado que se diga con su descubrimiento, dado que le costó una bonita cantidad de dinero.

Nacido cien años después de Laplace, Poincaré creía, como su compatriota, en un universo mecánico, un universo regido por leyes matemáticas plenamente predecibles. Escribió: «Si conocemos con exactitud las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el instante inicial, podemos predecir exactamente la situación del mismo universo en cualquier instante posterior».

Comprender el mundo fue la motivación principal de Poincaré para estudiar matemáticas: «Los hechos matemáticos que merece la pena estudiar son aquellos que, por su analogía con otros hechos, son capaces de conducirnos al conocimiento de una ley física».

Aunque las leyes del movimiento de Newton han generado una buena colección de ecuaciones matemáticas para describir la evolución del mundo físico, la mayoría de ellas son todavía sumamente complicadas de resolver. Tomemos por ejemplo las ecuaciones de un gas. Pensemos que el gas está hecho de partículas que chocan entre sí como diminutas bolas de billar, y así, teóricamente, el comportamiento futuro del gas está entonces atado a las leyes del movimiento de Newton. Pero la ingente cantidad de bolitas implica que cualquier solución exacta está muy lejos de nuestro alcance. Los métodos estadísticos o probabilísticos son todavía, con mucha diferencia, las mejores herramientas para entender el comportamiento de miles de millones de moléculas.

Había una situación en la que el número de bolas de billar era razonablemente pequeño y en la que parecía abordable una solución. El sistema solar. Poincaré se obsesionó con la idea de predecir el comportamiento de los planetas en su danza hacia el futuro.

Como la atracción gravitatoria que un planeta ejerce sobre otro que se encuentra a cierta distancia es la misma si suponemos que la masa del planeta está concentrada en su centro de gravedad, para determinar el destino último del sistema solar podemos considerar los planetas como si fueran simplemente puntos en el espacio, igual que hizo Newton. Esto significa que la evolución del sistema solar puede describirse con tres coordenadas para cada planeta, que sitúan su centro de masas en el espacio, junto con tres números adicionales que registran la velocidad en cada una de las tres dimensiones del espacio. Las fuerzas que actúan sobre los planetas vienen dadas por las fuerzas gravitatorias ejercidas por cada

uno de los otros planetas. Con toda esta información, bastaría simplemente aplicar la segunda ley de Newton para trazar el curso de los planetas en un futuro próximo o lejano.

El único problema es que las matemáticas involucradas en este cálculo son todavía sumamente dificultosas de manejar. Newton había resuelto el comportamiento de dos planetas (o de un planeta y un sol). Seguirían órbitas elípticas, con un foco común en el centro de gravedad común. El recorrido de las órbitas se repetiría periódicamente hasta el fin de los tiempos. Pero Newton se quedó atónito cuando introdujo un tercer planeta. Tratar de calcular el comportamiento de un sistema solar formado por, digamos, el Sol, la Tierra y la Luna, parecía bastante sencillo, pero aquí uno se enfrenta ya a una ecuación con 18 variables: 9 para las posiciones y 9 para las velocidades de los planetas. Newton reconoció que «considerar simultáneamente todas estas causas de movimiento y definir estos movimientos con leyes exactas que admitan cálculos fáciles es una tarea que, si no me equivoco, excede la capacidad de cualquier mente humana».

El problema recibió un gran impulso cuando el rey Óscar II de Noruega y Suecia decidió celebrar su sexagésimo cumpleaños con la oferta de un premio por la resolución de un problema matemático. No hay muchos monarcas en el mundo que escojan problemas matemáticos para celebrar su cumpleaños, pero a Óscar siempre le habían gustado mucho las matemáticas desde que destacó en ellas en su etapa de estudiante en la universidad de Upsala.

Su Majestad Óscar II, deseando mostrar de nuevo su interés por el avance de las ciencias matemáticas, ha resuelto otorgar un premio el día 21 de enero de 1889 a un descubrimiento importante en el campo del análisis matemático avanzado. El premio consistirá en una medalla de oro con la imagen grabada de su majestad por valor de mil francos, junto con la suma de dos mil quinientas coronas.

Tres matemáticos eminentes se reunieron con el fin de elegir una serie de desafíos matemáticos acordes con la ocasión y para evaluar posteriormente los trabajos de los participantes. Una de las cuestiones que plantearon fue establecer matemáticamente si el sistema solar era estable o no. ¿Continuaría funcionando siempre como un reloj o, por el contrario, en algún momento del futuro, podría la Tierra salirse de su órbita y alejarse del sistema solar?

Para responder a esta cuestión debían resolverse las ecuaciones que habían dejado paralizado a Newton. Poincaré pensó que estaba capacitado para ganar el premio. Uno de los trucos más usuales de los matemáticos consiste en plantear primero una versión simplificada del problema para ver si éste es abordable. De modo que Poincaré empezó por el problema con tres cuerpos celestes. Esto resultaba todavía demasiado difícil, así que decidió simplificarlo un poco más. En lugar del Sol, la Tierra y la Luna, ¿por qué no intentar entender dos planetas y una mota de polvo? Los dos planetas no se verían afectados por la mota de polvo, de modo que podía suponer, gracias a la solución que había dado Newton, que ambos planetas describirían elipses cada uno alrededor del otro. Por su lado, la mota de polvo estaría sometida a la fuerza gravitatoria de ambos planetas. Poincaré se concentró en tratar de describir el recorrido que seguiría la mota de polvo. Comprender algunas características de esta trayectoria podría ser una contribución interesante a la resolución del problema.

Aunque no pudo resolver el problema por completo, el artículo que envió tenía calidad sobrada para asegurarse el premio del rey Óscar. Había conseguido probar la existencia de una clase interesante de trayectorias que se repetirían indefinidamente, las llamadas trayectorias periódicas. Las órbitas periódicas eran estables por su propia naturaleza, ya que se repetirían una y otra vez, como las elipses que los dos planetas estaban llamados a recorrer.

Las autoridades francesas se mostraron entusiasmadas con el hecho de que el premio hubiese recaído en un compatriota. El siglo XIX había visto cómo las matemáticas alemanas le tomaban la delantera a las francesas, y por eso los académicos galos anunciaron con emoción que el éxito de Poincaré era una prueba del renacimiento de las matemáticas patrias. Gaston Darboux, secretario permanente de la Academia Francesa de Ciencias, declaró: «A partir de ese momento, el nombre de Henri Poincaré empezó a ser conocido por el público, que se acostumbró a considerar a nuestro colega no ya como un matemático especialmente prometedo, sino como un gran científico del que Francia podía enorgullecerse».

UN PEQUEÑO ERROR CON TREMENDAS CONSECUENCIAS

Enseguida comenzaron los preparativos para publicar la solución de Poincaré en una edición especial de *Acta Mathematica*, la revista de la Real Academia Sueca de Ciencias. Entonces llegó el momento que todo matemático teme. La peor pesadilla de cualquier matemático. Poincaré creía que su trabajo estaba a salvo. Había revisado todos los pasos de su demostración. Justo antes de la publicación, uno de los editores de la revista planteó una pregunta sobre uno de los pasos de su argumentación matemática.

Poincaré había dado por hecho que un pequeño cambio en las posiciones de los planetas, un pequeño redondeo por exceso o por defecto aquí o allá, era aceptable, ya que lo único que podría producir sería un pequeño cambio en las órbitas previstas. Parecía una suposición razonable. Pero no se daba ninguna justificación que aclarase por qué esto era así. Y en una demostración matemática, cada paso, cada supuesto, debe estar respaldado por una lógica matemática rigurosa.

El editor escribió a Poincaré solicitándole alguna aclaración sobre esta carencia de la demostración. Pero, al intentar justificar este paso, Poincaré cayó en la cuenta de que había cometido un error muy importante. Escribió entonces a Gösta Mittag-Leffler, el presidente de la comisión que decidía el premio, con la esperanza de reducir en lo posible el daño que podría sufrir su reputación:

Las consecuencias de este error son más importantes de lo que creí al principio. No pienso ocultarle el disgusto que descubrir esto me ha producido [...] No sé si seguirá pensando que los resultados que quedan merecen la gran gratificación que les han dispensado. (En todo caso, yo no puedo hacer nada salvo confesar mi confusión a un amigo tan leal como usted). Le escribiré con más detalle en cuanto vea las cosas con más claridad.

Mittag-Leffler decidió que era su obligación informar a los otros jueces:

La memoria de Poincaré ofrece una profundidad y un poder de invención tan raros que inaugurará ciertamente una nueva era en el ámbito del análisis y de sus aplicaciones en el campo de la astronomía. Pero antes serán necesarias explicaciones más detalladas, y en este momento le he pedido al distinguido autor que me ilustre sobre algunos puntos importantes.

Poincaré siguió cavilando, pero pronto vio que sencillamente estaba equivocado. Un cambio, por pequeño que fuera, en las condiciones iniciales, podría conducir a órbitas radicalmente distintas. No podía hacer las aproximaciones que había propuesto. Sus suposiciones eran erróneas.

Poincaré telegrafió a Mittag-Leffler para darle la mala noticia y para tratar de detener la impresión del artículo. Abochornado, escribió: «Puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan grandes diferencias en los fenómenos finales. Un pequeño error en las primeras pro-

ducirán un error enorme en los últimos. La predicción es imposible».

Mittag-Leffler se quedó «completamente desconcertado» con la noticia.

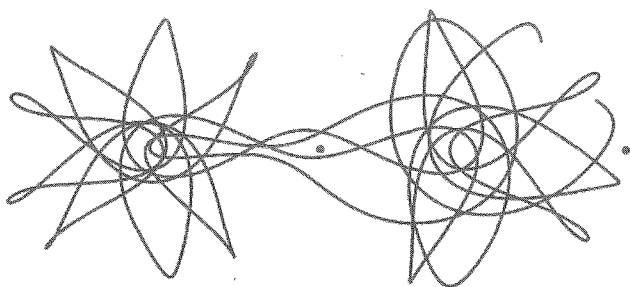
No tengo dudas de que su memoria será en todo caso considerada como una pieza genial por la mayoría de los geómetras, y que será el punto de partida de todos los esfuerzos futuros que se inviertan en la mecánica celestial. No piense, por tanto, que me arrepiento de haberle otorgado el premio [...] Lo malo es que su carta llegó demasiado tarde y la memoria ya ha sido distribuida.

La reputación de Mittag-Leffler estaba también en entredicho, al no haber sido capaz de detectar el error antes de conceder públicamente el premio a Poincaré. ¡Ésta no era la manera de celebrar el cumpleaños de su monarca! «Por favor, no diga ni una palabra de esta lamentable historia a nadie. Le daré todos los detalles mañana».

Durante las siguientes semanas se intentó retirar los ejemplares impresos sin levantar sospechas. Mittag-Leffler sugirió que Poincaré pagara la impresión de la versión original. Poincaré, que se sintió mortificado, accedió, aunque la factura ascendía a más de tres mil quinientas coronas, mil coronas más que las que recibió por el premio.

En un intento por enmendar el error, Poincaré se volcó en la tarea de comprender dónde y por qué se había equivocado. En 1890, Poincaré escribió un segundo artículo, ampliado, en el que explicaba su creencia de que cambios muy pequeños podrían ser la causa de que un sistema aparentemente estable se disperse de modo repentino.

Lo que Poincaré descubrió, gracias a su error, condujo a uno de los conceptos matemáticos más importantes del último siglo: el caos. Fue un descubrimiento que fija enormes límites a lo que los humanos nos es dado conocer. Puedo haber escrito todas las ecuaciones que afectan a mi dado, pero



La trayectoria caótica descrita por un único planeta que orbita en torno a dos soles.

¿qué pasa si el dado se comporta como los planetas del sistema solar? Según el descubrimiento de Poincaré, si cometo un pequeño error al registrar la localización del punto de partida del dado, este error podría ir creciendo y, al detenerse el dado sobre la mesa, producir un resultado muy diferente del esperado. ¿Será entonces que el futuro de mi dado de Las Vegas está envuelto en las matemáticas del caos?

Si no hubiera belleza en la naturaleza, no merecería la pena conocerla, y si no mereciera la pena conocerla, no merecería la pena vivir.

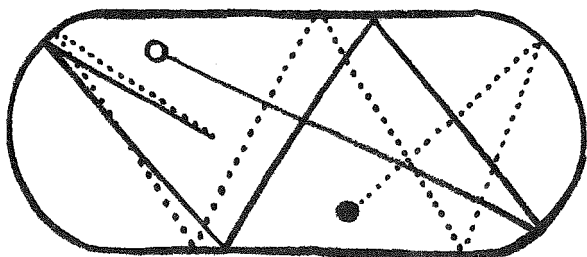
HENRI POINCARÉ

Malgasté mucho tiempo en la universidad jugando al billar en la sala de recreo de los estudiantes. Podía haber dicho que formaba parte de mis investigaciones sobre ángulos y demás, pero la verdad es que estaba aplazando mis tareas. Era un buen modo de posponer el tener que enfrentarme a la hoja de problemas de la semana, que no sabía resolver. Pero de hecho las cuatro esquinas de la mesa de billar encierran muchas matemáticas interesantes. Matemáticas que tienen mucho peso en mi deseo de comprender los dados.

Si golpeamos una bola de billar y marcamos el camino que sigue en la mesa, y a continuación realizamos un segundo tiro con otra bola, casi en la misma dirección, esta segunda bola trazará una trayectoria muy parecida a la de la primera bola. Poincaré creyó que este mismo principio era aplicable al sistema solar. Si lanzamos un planeta en una dirección ligeramente distinta, entonces el sistema solar evolucionará de modo muy parecido. Es lo que la intuición dicta a la mayor parte de las personas: si hacemos un pequeño cambio en las condiciones iniciales de la trayectoria del planeta, no se alterará mucho su curso. Pero parece que el sistema solar está jugando a un juego de billar algo más interesante que el que yo jugaba cuando era estudiante.

Aunque parezca bastante sorprendente, si cambiamos la forma de la mesa de juego, dicha intuición resulta errónea. Por ejemplo, si lanzamos la bola en una mesa de billar con la

forma de un estadio, con extremos semicirculares y lados rectos, las trayectorias pueden divergir drásticamente incluso en el caso de que hayan partido casi exactamente en la misma dirección. Éste es el carácter distintivo del caos: sensibilidad extrema a cambios muy pequeños en las condiciones iniciales.



Dos trayectorias que divergen rápidamente asumidas por dos bolas de billar en una mesa en forma de estadio.

Así que el reto es determinar si el resultado de lanzar el dado es predecible, como en el juego normal de billar, o si el dado está jugando a un billar caótico.

EL DIABLO EN LOS DECIMALES

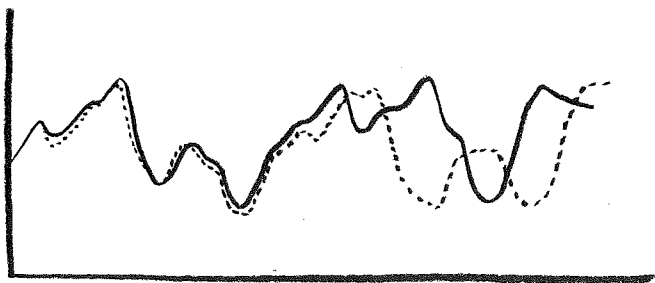
A pesar de que Poincaré es considerado el padre del caos, resulta llamativo que esta sensibilidad de muchos sistemas dinámicos ante pequeños cambios no haya sido muy conocida durante las primeras décadas del siglo XX. En realidad, fue preciso que el científico Edward Lorenz redescubriera el fenómeno al pensar que había cometido un error como Poincaré para que la idea del caos alcanzase un reconocimiento más amplio.

Cuando ejercía de meteorólogo en el MIT en 1963, Lorenz había estado trabajando con ecuaciones para el cambio de temperatura en un fluido dinámico en su ordenador y llegó un momento en el que decidió que era preciso alargar la ejecución del programa de uno de sus modelos. Así que tomó los

datos que había proporcionado el programa en un momento previo de su ejecución y volvió a introducirlos como datos iniciales, con la idea de reanudar el modelo a partir de ese punto.

Cuando volvió de su pausa para tomar un café, descubrió con preocupación que el ordenador no había reproducido los datos previos, sino que había generado rápidamente una predicción del cambio de temperatura disparatadamente diferente. Al principio no comprendió lo que había ocurrido. Si introduces los mismos números en una ecuación, no esperas obtener una respuesta totalmente diferente. Le llevó cierto tiempo descubrir qué estaba pasando: no había introducido los mismos números. En el listado de los datos del ordenador que había utilizado, los números aparecían solamente con tres decimales, mientras que el ordenador había hecho los cálculos usando esos números pero con seis decimales.

Aunque los números eran ciertamente diferentes, solamente diferían a partir del cuarto decimal. Uno no espera que esto produzca cambios significativos, pero Lorenz comprobó con estupor el impacto que estas pequeñas diferencias en los números iniciales produjeron en los datos resultantes. He aquí dos gráficas creadas usando la misma ecuación pero en las que los datos introducidos difieren muy ligeramente. Una gráfica usa como dato inicial 0,506127, mientras que la otra aproxima este número a 0,506. Aunque ambas empiezan siguiendo caminos similares, rápidamente se comportan de manera completamente diferente.



El modelo que Lorenz estaba simulando era una simplificación de modelos para el tiempo atmosférico que analizaban cómo se comportan las corrientes de aire cuando sufren diferencias de temperatura. Su redescubrimiento de cómo pequeños cambios en la manera de iniciar un sistema pueden producir un tremendo impacto en los resultados tendría ingentes consecuencias para nuestras pretensiones de usar las ecuaciones matemáticas para hacer predicciones del futuro. Como escribió Lorenz:

Dos estados que eran imperceptiblemente diferentes podían evolucionar hacia dos estados considerablemente diferentes. Cualquier error cometido en la observación del estado presente—y en un sistema real, esto parece inevitable—puede hacer imposible una predicción aceptable del estado en un futuro lejano.

LA VENGANZA DEL SALTAMONTES

Cuando Lorenz explicó sus descubrimientos a un colega, éste le contestó: «Edward, si tu teoría es correcta, el batido de las alas de una gaviota podría alterar el curso de la historia para siempre».

La gaviota acabaría convirtiéndose definitivamente en la famosa mariposa cuando Lorenz presentó sus descubrimientos en 1972 en la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia con un artículo titulado «¿Podría el batir de alas de una mariposa en Brasil provocar un tornado en Texas?».

Curiosamente, es posible que tanto a la gaviota como a la mariposa se les haya anticipado el saltamontes. En efecto, parece que ya en 1898 el profesor W. S. Franklin era consciente del efecto devastador que la comunidad de los insectos podría tener en el tiempo atmosférico. En la reseña de un libro, escribió:

Una causa infinitesimal puede producir un efecto finito. La predicción detallada a largo plazo del tiempo atmosférico es por lo tanto imposible, y la única predicción detallada que es posible es la inferencia de las últimas tendencias y el carácter de una tormenta a partir de las observaciones de sus estadios iniciales; y la exactitud de esta predicción está sujeta a la condición de que el vuelo de un saltamontes en Montana ¡puede desatar una tormenta desde Filadelfia hasta Nueva York!

Esto nos coloca en una posición bastante incómoda. Las ecuaciones que la ciencia ha descubierto nos dan una descripción completamente determinista de la evolución de muchos sistemas dinámicos como el tiempo atmosférico. Y sin embargo, en numerosos casos nos deniegan el acceso a las predicciones que podrían hacer, porque cualquier medición de la posición o la velocidad de una partícula será, inevitablemente, una aproximación de las verdaderas condiciones.

Por esto, cuando el Servicio Meteorológico Nacional del Reino Unido elabora el pronóstico del tiempo, considera los datos recogidos por las estaciones que hay repartidas por todo el país y luego, en vez de utilizar las ecuaciones solamente con estos datos, los meteorólogos ejecutan los programas miles de veces, variando los datos en un intervalo de valores. Las predicciones se mantienen parejas un tiempo, pero aproximadamente a partir del quinto día los resultados suelen divergir tanto que un conjunto de datos pronostican una ola de calor en el Reino Unido, mientras que esos mismos datos ligeramente modificados en algunos decimales pronostican lluvias torrenciales.

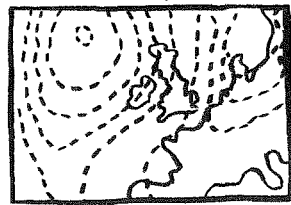
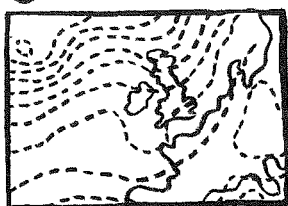
El gran científico escocés James Clerk Maxwell formuló la importante idea de que un hecho puede ser determinista y sin embargo imposible de conocer, en su libro *Materia y movimiento*, publicado en 1877: «Hay un principio que se cita con frecuencia: “Las mismas causas producirán siempre los mismos efectos”». Esto desde luego lo cumple cualquier

A: Comienzo



A: Pronóstico para el cuarto día

B: Comienzo



B: Pronóstico para el cuarto día

Partiendo de casi las mismas condiciones, el pronóstico A anuncia fuertes vientos y lluvia sobre las islas británicas dentro de cuatro días, mientras que el pronóstico B anuncia la llegada de un anticiclón por el Atlántico.

ecuación matemática que describa un sistema dinámico. Si se introducen los mismos números en la ecuación nunca surgirán sorpresas. Pero Maxwell añade: «Hay otro principio, que no debe confundirse con el anterior, que dice: “Causas parecidas producen efectos parecidos”. Esto sólo es cierto si pequeñas variaciones en las circunstancias iniciales producen solamente pequeñas variaciones en el estado final del sistema». El descubrimiento de la teoría del caos en el siglo xx demostró que este segundo principio es falso.

Esta sensibilidad ante los pequeños cambios en las condiciones iniciales puede sabotear mis intentos de usar las ecuaciones que he escrito en mi libreta para predecir el resultado de la tirada del dado. Tengo las ecuaciones, pero ¿puedo estar de verdad seguro de que he medido bien el ángulo con el que el dado ha salido de mi mano, la velocidad a la que gira o la distancia hasta la mesa?

Por supuesto, no todo está completamente perdido. Hay veces en las que pequeños cambios no alteran el curso de las ecuaciones drásticamente, como las trayectorias en el billar normal. Lo importante es saber cuándo es imposible saber. Robert May descubrió, cuando analizaba la ecuación que describe el crecimiento de una población, un bonito ejemplo en el que se sabe el punto a partir del cual es imposible saber lo que va a pasar.

SABER CUÁNDO ES IMPOSIBLE SABER

Nacido en Australia en 1938, May había estudiado física y había trabajado un tiempo en superconductividad. Pero sus intereses académicos dieron un giro espectacular a finales de la década de los sesenta, cuando entró en contacto con el movimiento, recién creado, de responsabilidad social en la ciencia. Su interés se desplazó del comportamiento de colecciones de electrones a las cuestiones más apremiantes del comportamiento de las dinámicas de poblaciones de animales. En aquel tiempo, la biología no era un entorno natural para los que se inclinan por las matemáticas, pero después de los trabajos de May esa situación cambiaría por completo. La fusión de la formación matemática disciplinada que había recibido al estudiar física y una nueva sensibilidad hacia los fenómenos biológicos fue la que condujo a su gran descubrimiento.

En un artículo titulado «Modelos matemáticos sencillos con dinámica muy complicada», publicado en *Nature* en 1976, May exploró la dinámica de una ecuación matemática que describe el crecimiento de una población de un ciclo al siguiente. En él puso de manifiesto cómo una ecuación, por inocente que parezca, puede desencadenar un comportamiento extraordinariamente complejo en los números. Su ecuación para la dinámica de la población no era ninguna ecuación diferencial de las complicadas, sino una ecuación recur-

siva sencilla que cualquiera puede explorar con ayuda de una calculadora de bolsillo.

ECUACIÓN DE REALIMENTACIÓN PARA LA DINÁMICA DE POBLACIONES

Supongamos que tenemos una población animal cuyo número puede variar entre 0 y un valor máximo hipotético que llamaremos N . Dada una fracción Y (comprendida entre 0 y 1) de ese máximo, la ecuación determina cuál es, en el siguiente ciclo, la nueva fracción de la población que sobrevive después de la reproducción y la competición por conseguir alimento. Supongamos que en cada ciclo la tasa de reproducción viene dada por un número r . De modo que si la fracción de la población máxima que sobrevivió al final del ciclo fue Y , la siguiente generación constará de $r \times Y \times N$ individuos.

Pero no todos estos nuevos animales sobrevivirán. La ecuación determina que la fracción que no sobrevivirá está también dada por Y . Así que de los $r \times Y \times N$ animales que hay al principio del ciclo, $Y \times (r \times Y \times N)$ mueren. De modo que el total de animales que quedan al final del ciclo son $(r \times Y \times N) - (r \times Y^2 \times N) = [r \times Y \times (1 - Y)] \times N$, lo que significa que la fracción de la población máxima que vive en el ciclo actual es $r \times Y \times (1 - Y)$.

Esencialmente, el modelo supone que al final de cada ciclo la población que sobrevive se multiplica por un factor constante, llamado r , la tasa de reproducción, para dar lugar al número de animales al comienzo del siguiente ciclo. Pero no hay recursos suficientes para que todos ellos sobrevivan. La ecuación calcula entonces cuántos de estos animales resistirán hasta el final del ciclo. Este número de animales que sobreviven se multiplica de nuevo por el factor r para situarnos en la siguiente generación. La propiedad fascinante de esta

ecuación es que su comportamiento depende realmente sólo de la elección de r , la tasa de reproducción. Algunas elecciones para r conducen a comportamientos muy predecibles. Podemos saber exactamente cómo evolucionarán estos números. Pero hay un umbral a partir del cual perdemos el control. El conocimiento es ya inalcanzable porque la incorporación de un solo animal más al colectivo puede traducirse en una dinámica para las poblaciones drásticamente diferente.

Por ejemplo, May descubrió que si r está entre 1 y 3, entonces la población finalmente se estabiliza. En este caso no importa cuáles son las condiciones iniciales, ya que los números tenderán gradualmente a un valor fijo, que depende de r . Es como jugar al billar en una mesa que tiene un sumidero en el centro. Haga lo que haga con la bola, acaba finalmente cayendo por el sumidero.

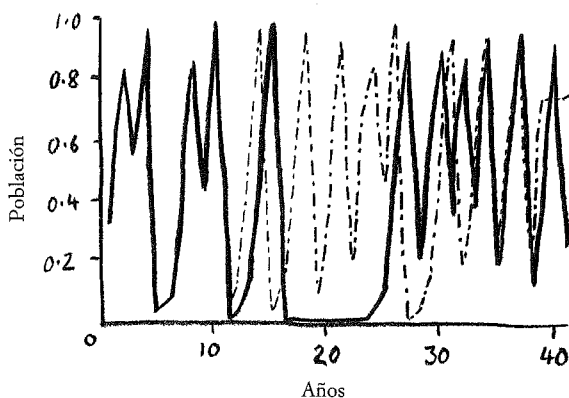
Para r mayor que 3, todavía se ve una región con un comportamiento predecible, aunque de tipo ligeramente distinto. Con r entre 3 y $1 + \sqrt{6}$ (que es aproximadamente 3,44949), la dinámica de la población oscila finalmente entre dos valores que dependen de r . Cuando r supera $1 + \sqrt{6}$, vemos que la dinámica de la población cambia de carácter otra vez. Para r entre $1 + \sqrt{6}$ y 3,54409 (o más precisamente, la solución de una ecuación polinomial de grado 12), hay 4 valores que la población va asumiendo periódica y cíclicamente. Cuando r aumenta, se obtienen 8 valores, luego 16, y así sucesivamente. Al crecer r , el número de valores diferentes se duplica cada vez, hasta que llegamos a un momento límite en el cual el carácter de la dinámica pasa de ser periódico a ser caótico.

La primera vez que May exploró esta ecuación admitió francamente que no tenía ni idea de lo que pasaba a partir de este punto. En una pizarra al lado de la puerta de su despacho en Sídney ofrecía un premio de 10 dólares australianos a quien pudiera explicar este comportamiento. Como escribió en la pizarra: «Parece un gran embrollo».

Encontró la respuesta en una visita a Maryland, y allí se

acuñó de hecho el término «caos». En el seminario que dio, explicó la región en la que el período se duplica, pero admitió que había llegado a un punto a partir del cual no sabía qué demonios pasaba. Entre el público había un matemático que sí lo sabía. Jim Yorke no había visto nunca el comportamiento del duplicado, pero sabía exactamente lo que iba a ocurrir en aquella región de valores más altos. Y fue lo que llamó caos.

Más allá de $r = 3,56995$ (o más precisamente, el punto límite de la solución de un sistema de ecuaciones de grado creciente), el comportamiento se hace muy sensible a los datos de la población original. Si se cambia el número inicial de animales en una cantidad nimia, puede sobrevenir un resultado totalmente diferente.



Dos poblaciones con $r = 4$ que arrancan con una diferencia de un único animal en una población de mil. Aunque al inicio su comportamiento es similar, transcurridos quince años muestran comportamientos muy diferentes.

Sin embargo, si aumento más los valores de r , puede haber todavía bolsas de comportamiento regular, como descubrió Jim Yorke. Por ejemplo, si tomamos $r = 3,627$, la población vuelve a ser periódica otra vez, brincando entre 6 valores di-

ferentes. Si seguimos aumentando los valores de r , del 6 se pasa al 12 y el 12 se convierte en 24, duplicándose este valor cada vez hasta que el caos ataca de nuevo.

Bob May supo justamente reconocer el disparo de advertencia que suponía un sistema tan simple para cualquiera que pensase que lo sabía todo: «No sólo en la investigación, sino también en el mundo cotidiano de la política y de la economía, estaríamos mejor si hubiera más gente consciente de que los sistemas sencillos no poseen necesariamente propiedades dinámicas sencillas».

LA POLÍTICA DEL CAOS

Bob May está ahora practicando lo que predica. O quizá debería decir mejor Lord May de Oxford, como me sugirió un hombre con sombrero de copa que me recibió en la puerta de entrada de los pares a la Cámara de los Lores. May ha compaginado durante los últimos años sus trabajos científicos con un vigoroso activismo político. Ahora ocupa un escaño del grupo mixto en la citada cámara, donde entré un momento a buscarlo para ir a almorzar juntos, con la idea de saber cómo lo hacía para alertar a los políticos del impacto en la sociedad de los sistemas caóticos.

Guiado a través de la puerta de los pares a la Cámara de los Lores por el hombre del sombrero de copa y unos cuantos policías con metralletas, me encontré con May al otro lado de los detectores de metales y las máquinas de rayos x. May no quiere saber nada de los títulos formales y sigue insistiendo, con su campechanía australiana, en que se le llame Bob.

—Me temo que me he despistado y ya he almorzado, pero le acompaño y tomaré una tarta mientras usted come algo.

Yo elegí pescado y él un enorme trozo de tarta de chocolate de la Cámara de los Lores. A sus setenta y nueve años, May sigue tan activo y ocupado como siempre y al concluir su segundo almuerzo salió corriendo a participar en un selecto

comité que iba a discutir el impacto de una segunda línea férrea entre Londres y el noroeste de Inglaterra.

Antes de su ingreso en la Cámara de los Lores, May fue el asesor principal en materia científica tanto del gobierno conservador de John Major como del gobierno laborista subsiguiente, encabezado por Tony Blair. Pensé que este puesto político habría sido como un traicionero ejercicio de equilibrio para un hombre al que normalmente no le asusta decir las cosas como son.

—Cuando me entrevistaron me dijeron que habría ocasiones en las que se me pediría defender las decisiones de un ministro y me preguntaron cómo me sentiría en ese caso. Les dije que lo que no haría en ninguna circunstancia sería negar un hecho. Por otra parte, soy bastante bueno en ese tipo de concursos de debate en los que se elige un tema y se echa a suertes si te toca defender una postura o la contraria. Así que dije que explicaría con gusto cómo llegó el ministro a adoptar la decisión tomada. Lo que no iba a hacer es respaldarla si era errónea.

Una respuesta típicamente matemática. Tómense los axiomas del ministro y muéstrese la prueba que conduce a la conclusión. Un tratamiento libre de juicios. Esto no quiere decir que May no sea vehemente y que no esté dispuesto a dar su opinión sobre el asunto que se trate.

Sentía curiosidad por saber cómo manejan los gobiernos los problemas que la teoría del caos crea a quienquiera que haya de tomar decisiones políticas. ¿Cómo asumen los políticos los retos de predecir o manipular el futuro, dado que solamente podemos tener un conocimiento parcial de los sistemas que hemos de analizar?

—Me parece que ésa es una visión muy idealista de lo que pasa aquí. Con algunas notables excepciones, estamos hablando de un grupo de gente que es sobre todo muy egocéntrica y muy ambiciosa, y que lo que más le interesa es su propia carrera.

Pero ¿qué pensaba May personalmente? ¿Qué impacto tuvieron sus descubrimientos sobre su visión del papel de las ciencias en la sociedad?

—Fue raro. Significó el fin del sueño newtoniano. Cuando era estudiante de doctorado, se pensaba que a medida que tuviéramos mayor capacidad de computación conseguiríamos pronósticos del tiempo cada vez mejores, porque conocíamos las ecuaciones y podríamos hacer modelos más realistas de la Tierra.

Pero May es cuidadoso, no sea que vengan los que niegan la realidad del cambio climático y utilicen la teoría del caos para minar el debate.

—No creer en el cambio climático porque los pronósticos del tiempo no son de fiar es un poco como no creer en las mareas sólo porque no se sabe dónde romperá la próxima ola en la playa de Bondi.

A May le gusta citar un pasaje de la obra teatral *Arcadia* de Tom Stoppard para ilustrar la extraña tensión que existe entre el poder de la ciencia para saber algunas cosas con una precisión extraordinaria y la teoría del caos, que nos deniega el conocimiento de muchas partes del mundo natural. Una de las protagonistas, Valentine, afirma: «Para nosotros es más fácil predecir cosas que sucederán en los confines de la galaxia o en el núcleo de un átomo que saber si lloverá o no en la fiesta del jardín de la tía dentro de tres semanas».

May bromea sobre el hecho de que sus trabajos más citados no son los artículos académicos de gran repercusión que ha publicado en revistas científicas de prestigio como *Nature*, sino las notas al programa de mano que escribió para la obra de Stoppard cuando se estrenó en el Teatro Nacional de Londres.

—Esto pone en ridículo a todos esos índices de citas que pretenden medir el impacto de la investigación científica.

¿Cuáles son entonces las grandes cuestiones abiertas de la ciencia de las que May desearía saber la respuesta? ¿La conciencia? ¿Un universo infinito?

—Creo que prefiero mirar las cosas de una manera no tan amplia, planteármelo más bien en términos de lo que estoy investigando ahora. En gran medida por accidente, las circunstancias me han llevado a interesarme por cuestiones bancarias.

Esto fue una sorpresa. La cuestión de crear un sistema bancario estable parecía un poco estrecha de miras, pero May ha estado últimamente aplicando sus modelos para la propagación de las enfermedades infecciosas y la dinámica de las redes alimentarias ecológicas a fin de comprender la crisis bancaria de 2008. Trabajando en colaboración con Andrew Haldane, del Banco de Inglaterra, ha considerado la red financiera como si fuera un ecosistema. Sus investigaciones han puesto de manifiesto que los instrumentos financieros diseñados para optimizar los rendimientos de instituciones concretas con el mínimo riesgo aparente pueden sin embargo producir inestabilidad en el conjunto del sistema.

May piensa que el problema no es necesariamente la mecánica del propio mercado. Es el modo en el que las pequeñas cosas del mercado se amplifican y pervierten cuando los humanos interactúan con ellas. Para él, lo más acuciante del desbarajuste bancario sería conseguir manejar mejor esta propagación contagiosa del miedo.

—El reto consiste en incluir el comportamiento humano en el modelo. No creo que la psicología humana pueda abordarse mediante las matemáticas. Aquí nos estamos jugando el futuro a los dados. Pero si aspiras a predecir el resultado de los dados, entonces quieres conocer las circunstancias de los poseedores de los dados.

Esto no lo había tenido en cuenta en mis intentos por predecir el resultado del dado de casino. Quizá deba incluir ante todo a la persona que me vendió el dado.

—Creo que muchos de los grandes problemas que afronta la sociedad están fuera de la esfera de la ciencia y de las matemáticas. Si queremos salvarnos, vamos a vernos obligados a confiar en las ciencias del comportamiento.

Mirando a nuestro alrededor en la cafetería de la Cámara de los Lores, podíamos ver el ingente despliegue y la complejidad del comportamiento humano en acción. Esto hace que el desafío de diseñar un modelo matemático de las interacciones humanas, incluso en un microcosmos minúsculo como éste, sea casi imposible. Como explicó el historiador francés Fernand Braudel en una charla sobre historia que dio a sus compañeros de prisión en un campo de concentración alemán, cerca de Lübeck, durante la Segunda Guerra Mundial: «Un número increíble de datos, siempre en movimiento, domina y determina cada existencia individual». Aunque cada dato es impredecible, existen patrones que aparecen en el comportamiento a la larga de un número grande de tiradas. En opinión de Braudel, esto es lo que hace posible el estudio de la historia: «Es verdad que la historia es “una pobre ciencia hecha de pequeñas conjeturas” cuando se fija como objeto el estudio de un individuo [...] pero mucho más racional en sus procedimientos y resultados cuando examina los grupos y las repeticiones».

No obstante, May opina que la comprensión de la historia y de los orígenes de la colección de datos que constituyen la raza humana entera no es tan sencillo como Braudel pretende. Por ejemplo, no está nada claro que podamos desentrañar cómo hemos llegado hasta aquí en nuestro viaje a lo largo de la evolución.

—Le voy a decir una de las cuestiones que creo que es particularmente interesante: tratar de entender nuestra trayectoria evolutiva como seres humanos en este planeta. La trayectoria por la que parece que vamos, ¿es la misma en todos o en la mayor parte de los planetas? ¿O es el resultado de fluctuaciones previas del caos, que nos han colocado en esta trayec-

toría y no en otra? ¿Sabremos alguna vez lo suficiente como para poder preguntarnos si el desastre al que parece que nos dirigimos es inevitable o si hay otros muchos planetas en los que la gente es más como Mr. Spock, menos emocional, menos fantástica, pero mucho más imparcial y analítica?

Hasta que descubramos otros planetas habitados y podamos estudiar sus trayectorias es difícil evaluar, basándonos en una sola base de datos llamada Tierra, si la evolución conduce inevitablemente a ecosistemas mal administrados.

—La cuestión de si la situación a la que nos dirigimos es algo que se dará en todos los planetas habitados o si hay otros planetas en los que no se dará, creo que es algo que nunca sabremos.

Y con esto May liquidó las últimas migajas de su tarta de chocolate y volvió a sumergirse en el caos de los comités selectos y de las políticas mezquinas de Westminster.

El último punto tratado por May está muy vinculado con el desafío que la teoría del caos plantea a la aspiración de saber algo del pasado, más que del futuro. Al menos con el futuro siempre nos queda la posibilidad de esperar y ver qué resultado producen las ecuaciones caóticas. Pero tratar de trabajar hacia atrás y comprender qué circunstancias concuerrieron en el planeta para producir el presente es igual o más arduo. Más que el futuro, probablemente sea el pasado lo que nunca podremos conocer con fidelidad.

LA VIDA: ¿UNA TIRADA FORTUITA DE LOS DADOS?

Las pesquisas pioneras de May exploraban la dinámica de una población al ir pasando de un ciclo al siguiente. Pero ¿qué determina que unos animales sobrevivan y otros mueran antes de reproducirse? Según Darwin, esto se debe sencillamente a una tirada más o menos feliz del dado evolutivo.

El modelo de la evolución de la vida en la Tierra se basa en la idea de que, una vez que tenemos organismos con ADN,

la descendencia de estos organismos comparten el ADN con sus progenitores. Pero parte del código genético del ADN puede sufrir mutaciones aleatorias. Éstas se deben esencialmente a una tirada fortuita del dado evolutivo. Pero hay un segundo aspecto de la propuesta de Darwin: la idea de la selección natural.

Algunos de esos cambios aleatorios harán a la prole más apta para la supervivencia, mientras que otros cambios supondrán una desventaja. La clave de la evolución por selección natural reside en que es más probable que los individuos con el cambio ventajoso sobrevivan el tiempo suficiente para reproducirse.

Supongamos, por ejemplo, que partimos de una población de jirafas que tienen el cuello corto. El entorno de las jirafas cambia y resulta que hay más comida en los árboles, de modo que cualquier jirafa que haya nacido con el cuello más largo va a tener más posibilidades de sobrevivir. Supongamos que lanzo mi dado de Las Vegas para determinar la suerte de sufrir una mutación adaptada a este cambio de entorno, para cada una de las jirafas nacida en la siguiente generación. Si sale 1, 2, 3, 4 o 5, la jirafa queda condenada a tener un cuello de la misma longitud o más corto, y si sale 6, tiene la suerte de sufrir una mutación que produce un cuello más largo. Las jirafas de cuello largo consiguen la comida y las jirafas de cuello corto no sobreviven lo suficiente como para reproducirse. Así que son justamente las jirafas de cuello largo las que tienen la oportunidad de transmitir su ADN.

En la siguiente generación pasa lo mismo. Si en el dado sale 1, 2, 3, 4 o 5, la jirafa no crece más que sus padres. Pero otro 6 hace que la jirafa crezca un poco más. De nuevo, la jirafa más alta sobrevive. El entorno favorece a las jirafas que han sacado un 6. Cada generación termina siendo un poco más alta que la generación anterior, hasta que llega un momento en el que ya no supone ninguna ventaja crecer más.

Es la combinación de suerte y de selección natural la que

hace que veamos hoy más jirafas cuyos antepasados sacaron todos un 6. En retrospectiva, parece muy sorprendente ver tantos seises en fila. Pero la clave es que no vemos otros muchos resultados de la tirada del dado porque corresponden a individuos que no sobrevivieron para reproducirse. Lo que parece un juego amañado no es más que una combinación de suerte y selección natural. No está operando ningún designio ni criterio reparador. La serie de seises consecutivos no es una racha de suerte, sino de hecho lo único que cabría ver a partir de este modelo.

Es un modelo sencillo y bonito, pero dada la complejidad de los cambios en el entorno y la diversidad de mutaciones que pueden producirse, este modelo sencillo puede generar una complejidad extraordinaria, que queda corroborada por la tremenda variedad de especies que existen en la Tierra. Una de las razones por las que nunca me entusiasmó realmente la biología es que no parecía haber ningún medio de explicar por qué este modelo evolutivo alumbró gatos y cebras y no otro surtido extraño de animales. Parecía tan arbitrario. Tan aleatorio. Pero ¿es ésta una interpretación acertada?

En la actualidad sigue vivo un interesante debate en biología evolutiva en el que se discute cuánto hay de aleatorio en los resultados que vemos. Si rebobinamos la historia de la vida en la Tierra hasta un punto del pasado y arrojamos otra vez los dados, ¿veríamos aparecer animales muy parecidos o surgiría algo completamente distinto? Es la cuestión que May planteó al final de la comida.

Lo que parece claro es que algunas partes de la evolución parecen inevitables. Resulta llamativo que el ojo haya evolucionado independientemente entre cincuenta y cien veces a lo largo de la historia evolutiva. Ésta es una prueba bastante sólida del hecho de que las diferentes tiradas de los dados que han guiado el desarrollo de diferentes especies parecen haber producido especies con ojos independientemente de lo que pasaba en su entorno. Hay otros muchos ejemplos que

ilustran cómo algunos rasgos, si son ventajosos, parecen subir a la superficie de la ciénaga evolutiva. Esto queda ilustrado cada vez que vemos aparecer el mismo rasgo más de una vez en diferentes partes del reino animal. Por ejemplo, tanto los delfines como los murciélagos usan la ecolocalización, pero desarrollaron esta capacidad independientemente, en puntos muy diferentes del árbol evolutivo.

Pero no está claro hasta dónde estos resultados están garantizados por el modelo. Si existe vida en otros planetas, ¿se parecerá en algo a la vida que ha evolucionado aquí en la Tierra? Éste es uno de los grandes problemas no resueltos de la biología evolutiva. Por difícil que sea resolverlo, no creo que reúna los requisitos de algo que nunca podremos saber. Es posible que acabe siendo algo que nunca sepamos, pero no hay nada en su propia naturaleza que lo haga irresoluble.

¿DE DÓNDE VENIMOS?

¿Hay otras grandes cuestiones sin resolver en biología evolutiva que podrían aspirar a entrar en la lista de cosas que nunca podremos saber? Por ejemplo, ¿por qué hace 542 millones de años, al comienzo del período Cámbrico, se produjo una explosión de diversidad de vida sobre la Tierra? Antes de este momento, la vida consistía en células sueltas que se juntaban formando colonias. Pero a lo largo de los 25 millones de años siguientes, un período relativamente corto a escala evolutiva, se produce una rápida diversificación de vida pluricelular que termina pareciéndose a la diversidad que vemos hoy. Falta todavía una explicación de esa fase de la evolución tan excepcionalmente rápida. En parte, esto se debe a la falta de datos sobre este período. ¿Podremos alguna vez recuperar estos datos o esa fase seguirá siendo siempre un misterio?

La teoría del caos suele ser un factor que limita lo que podemos saber del futuro. Pero también puede implicar límites para lo que podemos saber del pasado. Vemos los resul-

tados, pero deducir la causa significa ejecutar las ecuaciones hacia atrás. Sin los datos completos, el mismo principio se aplica hacia delante o hacia atrás. Podríamos encontrarnos con dos puntos de partida muy divergentes que pueden explicar resultados muy parecidos. Pero nunca sabremos cuál de estos orígenes fue el nuestro.

Uno de los grandes misterios de la biología evolutiva es cómo surgió la vida. El juego de la vida puede favorecer la aparición de seises en las tiradas del dado evolutivo, pero ¿cómo nació el juego mismo? Se han hecho estimaciones de la probabilidad de que todas las circunstancias se alineen simultáneamente a favor de producir moléculas que se auto-repican. En algunos modelos del origen de la vida, esto es equivalente a que la naturaleza haya arrojado 36 dados y haya obtenido un 6 en todos ellos. Para algunos, esto es una prueba de que es preciso un creador que amañe el juego. Pero así se minusvalora la cantidad ingente de tiempo que dura el proceso del que hablamos.

Los milagros ocurren: es cuestión de tiempo. En realidad, sería más sorprendente que no ocurrieran estas extrañas anomalías. La clave es que las anomalías suelen llamar la atención. Nos fijamos en ellas, mientras que los resultados de las tiradas de los dados menos interesantes caen en el olvido.

La lotería es un banco de pruebas perfecto para la aparición de milagros en un proceso aleatorio. El 6 de septiembre de 2009 los seis números ganadores de la lotería estatal búlgara fueron los siguientes:

4, 15, 23, 24, 35, 42

Cuatro días más tarde volvieron a salir los seis mismos números. Increíble, podríamos pensar. El gobierno búlgaro ciertamente pensó lo mismo y ordenó una investigación inmediata ante la posibilidad de que los sorteos se hubieran amañado. Pero lo que dicho gobierno no tuvo en cuenta es

que cada semana hay sorteos de lotería por todo el planeta. Los ha habido durante décadas. Si se hacen los cálculos matemáticos adecuados, se verá que sería más sorprendente no ver algún que otro resultado aparentemente anómalo como éste.

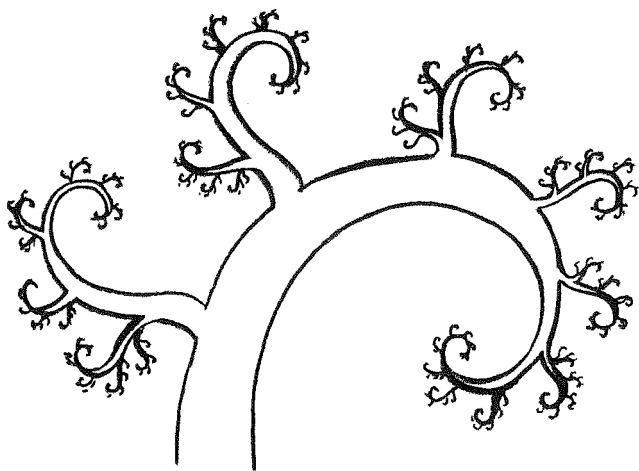
El mismo principio es válido para las condiciones bajo las cuales se producen moléculas autorreplicantes en el caldo primitivo que constituía la Tierra antes de que surgiera la vida. Si mezclamos hidrógeno, agua, dióxido de carbono y algunos otros gases orgánicos, y los sometemos a descargas eléctricas como las de los rayos y a radiaciones electromagnéticas, surgirá material orgánico que solamente se ha encontrado en los seres vivos, como han demostrado ya algunos experimentos de laboratorio. Nadie ha conseguido generar espontáneamente algo tan extraordinario como el ADN en el laboratorio. La probabilidad de hacerlo es muy pequeña.

Pero ahí está la clave. Dado el trillón de posibles planetas que aproximadamente hay en el universo en los que ensayar el experimento, junto con los más o menos mil millones de años durante los cuales se podría ensayar, sería más sorprendente que esa posibilidad remota de crear algo como el ADN no se diera alguna vez. Si arrojamos 36 dados en un trillón de planetas diferentes durante mil millones de años, seguramente alguna vez saldrá un 6 simultáneamente en los 36 dados. Una vez que aparezca una molécula autorreplicante, ésta contará con medios para reproducirse, con lo cual basta tener suerte una vez para poner en marcha la evolución.

Cuando se trata de percibir la posibilidad de que ocurra un milagro como el nacimiento de la vida, nuestro problema como humanos es que no hemos desarrollado mentes capaces de manejar números muy grandes. Por ello poseemos muy poca intuición para comprender la probabilidad.

EL ÁRBOL FRACTAL DE LA VIDA

Sin embargo, en la evolución no solamente cuentan las matemáticas de la probabilidad. El propio árbol evolutivo posee una cualidad interesante similar a la que tienen las formas que aparecen en la teoría del caos: la fractalidad.



El árbol evolutivo fractal.

El árbol evolutivo es una representación gráfica de la evolución de la vida en la Tierra. Moverse a lo largo del árbol es hacerlo en el tiempo. Cada bifurcación del árbol representa la evolución de una nueva especie. Cuando una rama se termina, significa la extinción de esa especie. El árbol es de tal naturaleza que su forma global parece repetirse a escala cada vez más pequeña. Ésta es la propiedad característica de una forma que los matemáticos llaman fractal. Si ampliamos la imagen de una pequeña parte del árbol, ésta se parece notablemente a la estructura a gran escala del árbol. Dicha autosemejanza significa que es muy difícil distinguir a qué escala estamos viendo el árbol. Ésta es la característica clásica de un objeto fractal.

Los objetos fractales suelen ser la firma de un sistema caó-

tico, lo que indica que la evolución se rige por una dinámica caótica: los pequeños cambios en el código genético pueden producir enormes cambios en los resultados de la evolución. Este modelo no es necesariamente un desafío a la idea de convergencia, ya que en los sistemas caóticos puede haber todavía puntos hacia los cuales el modelo tiende a evolucionar. Dichos puntos se llaman atractores. Pero ciertamente cuestiona la idea de que, si se reiniciara la evolución, se obtendría algo parecido a lo que tenemos en la Tierra hoy. El biólogo evolutivo Stephen Jay Gould ha defendido que si se rebobinara la cinta de la vida, se obtendrían resultados muy diferentes. Esto es lo que se espera de un sistema caótico. Igual que en el tiempo atmosférico, cambios muy pequeños en las condiciones iniciales pueden traer como consecuencia un resultado drásticamente diferente.

Gould introdujo también la idea de equilibrio puntuado, que capta el hecho de que las especies parecen permanecer estables durante largos períodos y luego sufren lo que parece ser un cambio evolutivo muy rápido. Se ha probado que también éste es un rasgo característico de los sistemas caóticos. Las implicaciones del caos presente en la evolución son que muchas de las cuestiones de la biología evolutiva podrían muy bien caer en el ámbito de las cosas que no podemos conocer, por sus conexiones con las matemáticas de la teoría del caos.

Por ejemplo, ¿sabremos alguna vez que estábamos destinados a evolucionar hasta convertirnos en humanos a partir del modelo actual de evolución? Un análisis del ADN de diferentes animales nos ha proporcionado una visión excepcional del modo en que los animales evolucionaron en el pasado. El registro fósil, aunque incompleto en algunos sitios, nos ha proporcionado también un método para conocer nuestros orígenes. Pero, dada la escala de tiempo que abarca la evolución, es imposible hacer experimentos y rebobinar la cinta de la vida que ha evolucionado en la Tierra y ver si hu-

biera podido ocurrir algo diferente. En cuanto encontremos vida en otros planetas (si la encontramos), tendremos nuevos juegos de muestras para analizar. Pero hasta entonces no todo está perdido. Igual que en el Servicio Meteorológico no necesitan ejecutar el tiempo atmosférico real para hacer predicciones, los modelos de ordenador pueden ilustrar diferentes posibles resultados del mecanismo de la evolución, acelerando el paso del tiempo. Pero el modelo no puede ser mejor que las hipótesis que hemos introducido en él. Si hemos elegido el modelo incorrecto, no nos dirá lo que ha pasado realmente en la naturaleza.

Por estos modelos de simulación por ordenador pasa cualquier intento de contestar a la pregunta que primero abordó Poincaré cuando descubrió el caos: ¿habrá siempre una Tierra estable orbitando alrededor del Sol para que la evolución pueda seguir jugando a los dados? ¿Se encuentra libre nuestro planeta de los caprichos del caos? ¿Es nuestro sistema solar estable y periódico, o tenemos que preocuparnos de algún saltamontes que distorsione nuestra órbita alrededor del Sol?

UNA MARIPOSA LLAMADA MERCURIO

Poincaré no fue capaz de contestar la pregunta del rey de Suecia sobre el sistema solar: ¿permanecerá en equilibrio estable o podría dispersarse en una demostración catastrófica de movimientos caóticos? Su descubrimiento de que algunos sistemas dinámicos pueden ser sensibles a pequeños cambios en los datos abrió la posibilidad de que no podamos saber nunca el destino preciso del sistema solar con mucha antelación ante el despliegue de cualquier coyuntura potencialmente devastadora.

Es posible que, como la dinámica de las poblaciones con una tasa de reproducción baja, el sistema solar esté en una región de actividad predictiva segura. Por desgracia, los indi-

cios sugieren que no podemos consolarnos con esta esperanza matemática confortante. Modelos de simulación por ordenador recientes han proporcionado nuevos conocimientos que revelan que el sistema solar está, en efecto, dentro de una región dominada por las matemáticas del caos.

Podemos medir cuánto afectará en el resultado un pequeño cambio usando una herramienta llamada exponente de Lyapunov. Por ejemplo, en el caso del billar jugado en mesas con diferentes formas, podemos medir cuán catastrófico puede resultar un pequeño cambio en la evolución de la trayectoria de la bola. Que el exponente de Lyapunov de un sistema sea positivo significa que si hacemos un pequeño cambio en las condiciones iniciales, la distancia entre las trayectorias divergirá exponencialmente. Esto puede usarse como una definición del caos.

Con esta medida, varios grupos de científicos han confirmado que nuestro sistema solar es en realidad caótico. Han calculado que la distancia entre dos soluciones orbitales inicialmente próximas se multiplica por 10 cada 10 millones de años. Esto se sitúa ciertamente en una escala de tiempo diferente a la que nos impide predecir el tiempo atmosférico. Sin embargo, significa que no podemos tener un conocimiento preciso de lo que le pasará al sistema solar dentro de 5 mil millones de años.

Si el lector se pregunta desesperado por qué no podemos saber nada acerca del futuro, puede animarse pensando en el hecho de que las matemáticas no son del todo inútiles a la hora de hacer predicciones. Las ecuaciones garantizan que hay un suceso que ocurrirá dentro de 5 mil millones de años, pero no se trata de una buena noticia: las matemáticas implican que para entonces al Sol se le acabará la gasolina y se convertirá en una gigante roja que engullirá al planeta Tierra y a los demás planetas del sistema solar. Pero antes de que el Sol reviente y se trague el sistema solar, si queremos saber qué planetas quedarán y podrán ver la gigan-

te roja, nos tenemos que enfrentar al reto de resolver ecuaciones caóticas.

Esto significa que, como en las predicciones del tiempo atmosférico, si queremos saber lo que va a pasar, nos vemos limitados a implementar simulaciones en las que variamos las localizaciones y las velocidades precisas de los planetas. En algunos casos el pronóstico es bastante alarmante. En 2009 los astrónomos franceses Jacques Laskar y Mickaël Gastineau implementaron varios miles de modelos de la evolución futura del sistema solar. Y sus experimentos han identificado una posible mariposa: Mercurio.

Las simulaciones comienzan cargando los datos que tenemos de momento sobre las posiciones y velocidades de los planetas, aunque es difícil conocerlas con una precisión total. Así que cada vez que se ejecuta una simulación, se introducen pequeños cambios en los datos. A causa de los efectos de la teoría del caos, con sólo un pequeño cambio se podría producir una gran discrepancia en los resultados.

Por ejemplo, los astrónomos conocen las dimensiones de la elipse de la órbita de Mercurio con una precisión de algunos metros. Laskar y Gastineau ejecutaron 2.501 simulaciones en las que variaron estas dimensiones dentro de un margen de menos de un centímetro. Esta perturbación tan pequeña fue suficiente para producir resultados en el sistema solar asombrosamente diferentes.

Uno esperaría que si el sistema solar está destinado a romperse la culpa la tuviera alguno de los grandes planetas, como Júpiter o Saturno. Pero las órbitas de los gigantes gaseosos son sumamente estables. Los que crean problemas son los planetas terrestres rocosos. En el 1 % de las simulaciones que ejecutaron, fue el diminuto Mercurio el que entrañó el mayor riesgo. Los modelos muestran que la órbita de Mercurio podría empezar a ampliarse a causa de una cierta resonancia con Júpiter, con la posibilidad de que Mercurio pudiera chocar con su vecino inmediato, Venus. En una simulación,

un error mínimo era suficiente para desajustar a Venus, que acabaría chocando con la Tierra. Y un acercamiento excesivo de alguno de los demás planetas sería suficiente para causar una perturbación en las mareas de tal magnitud que resultaría desastrosa para la vida en nuestro planeta.

Esto no es simplemente un caso de especulación matemática abstracta. Se han observado pruebas de este tipo de choques en los planetas que orbitan en torno a la estrella binaria Upsilon Andromedae. Sus extrañas órbitas actuales pueden explicarse solamente a partir del hecho de que un planeta desafortunado se exorbitó en algún momento del pasado de esta estrella. Pero antes de salir corriendo, pensemos que las simulaciones revelan que tendrían que pasar varios miles de millones de años antes de que Mercurio pudiera empezar a portarse mal.

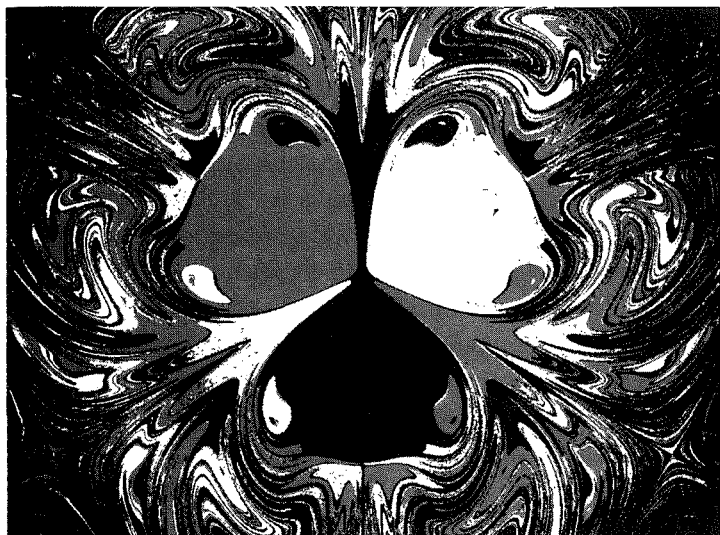
COMPLEJIDAD INFINITA

¿Qué pasa entonces con la posibilidad de predecir el resultado de una tirada del dado que tengo junto a mí? Laplace hubiera dicho que, siempre y cuando sepamos las dimensiones del dado, la distribución de los átomos, la velocidad a la que es lanzado y su relación con el entorno, teóricamente sería posible el cálculo de la cara sobre la que caerá.

Los descubrimientos de Poincaré y sus sucesores han revelado que simplemente unos pocos decimales podrían explicar la diferencia que supone que el dado aterrice mostrando un 6 o un 2. El dado está diseñado de modo que solamente son posibles seis resultados, pero los datos de salida pueden recorrer un espectro en principio continuo de valores. Así que claramente habrá puntos en los que un cambio muy pequeño hará que el dado se voltee y muestre un 2 en vez de un 6. Pero ¿de qué tipo son estas transiciones?

Los modelos de simulación por ordenador pueden producir representaciones visuales muy buenas que permiten

controlar la sensibilidad de diversos sistemas ante las condiciones iniciales. Junto a mi dado de Las Vegas tengo un juguete clásico de mesa con el que me entretengo durante horas. Consiste en un péndulo metálico que es atraído por tres imanes, uno blanco, otro negro y otro gris. El análisis de la dinámica de este juguete conduce a una imagen que refleja el destino final del péndulo cuando éste parte de un punto dado de la base cuadrada del juguete. Un punto se pinta de blanco si, al partir el péndulo de este punto, acaba pegado al imán blanco. Análogamente, se pinta de negro o gris si el destino final del péndulo es el imán negro o gris. Ésta es la imagen resultante:



Como en el caso de la dinámica de las poblaciones, hay regiones que son completamente predecibles. Si partimos cerca de un imán, el péndulo será atraído solamente por ese imán. Pero por los bordes de la imagen nos encontramos en terrenos mucho menos predecibles. En realidad, la imagen es un ejemplo de un objeto fractal.

Hay regiones donde no se produce una transición sencilla entre el negro y el blanco. Si la ampliamos, en la imagen nunca aparece una región pintada de un solo color. Hay complejidad en todas las escalas.

Se puede construir un ejemplo unidimensional de una imagen de este tipo como sigue. Se dibuja un segmento de longitud unidad y se colorea la mitad de negro y la otra de blanco. Tomamos la mitad del segmento, desde el punto 0,25 hasta el punto 0,75, y lo rotamos 180 grados. Luego tomamos la mitad central del segmento anterior y lo rotamos también 180 grados. Si seguimos haciendo lo mismo hasta el infinito, el comportamiento previsto alrededor del punto 0,5 es sumamente sensible a los pequeños cambios. No hay ninguna región que incluya al punto 0,5 que tenga un solo color.

Hay una versión más elaborada de esta imagen. Empezamos de nuevo con un segmento de longitud uno. Borramos el tercio central del segmento. Nos quedamos así con dos líneas negras con un espacio blanco entre ellas. Ahora borramos el tercio central de cada una de estas dos líneas negras. Tenemos ahora una línea negra de $1/9$ de longitud, una línea blanca de $1/9$ de longitud, una línea negra de $1/9$ de longitud, la línea blanca de $1/3$ de longitud que se borró en la primera fase y luego se repite de nuevo el esquema negro-blanco-negro.



El lector habrá averiguado seguramente lo siguiente que vamos a hacer. Borramos en cada paso el tercio central de todas las líneas negras que veamos. Y seguimos así hasta el infinito. El diagrama resultante se llama conjunto de Cantor, en

honor al matemático alemán George Cantor, al que encontraremos en la última «frontera», en la que exploraremos lo que se puede saber del infinito. Supongamos que este conjunto de Cantor controlara de hecho el resultado del péndulo de mi juguete de mesa. Si movemos el péndulo sobre esta línea, vemos que la imagen predice un comportamiento muy complicado en algunas zonas.

Unos cálculos bastante extraños muestran que la longitud total de la línea que ha sido borrada es 1. Pero todavía quedan dentro puntos negros: el punto $1/4$ no es borrado nunca, igual que el $3/10$, por ejemplo. Estos puntos negros, sin embargo, no están aislados. Si tomamos el entorno de un punto negro, dentro de ese entorno habrá una infinidad de puntos negros y una infinidad de puntos blancos.

¿Qué aspecto presenta la dinámica de mi dado? ¿Es fractal y está, por lo tanto, fuera del alcance de mi conocimiento? Mi conjetura original era que el dado sería caótico. Sin embargo, algunas investigaciones recientes han supuesto una sorpresa.

EL CONOCIMIENTO DE LOS DADOS

Un equipo de investigación polaco ha analizado recientemente la tirada de un dado matemáticamente y, combinando esto con el uso de cámaras de alta velocidad, ha revelado que el dado puede no ser tan caótico e impredecible como me había temido al principio. El grupo de investigación está formado por un padre y su hijo, Tomasz y Marcin Kapitanak, junto con Jarosław Strzałko y Juliusz Grabski, y trabajan en Łódź. En su artículo de la revista *Chaos*, publicado en 2012, el equipo dibujó imágenes parecidas a la del péndulo magnético, pero las posiciones de partida son más complicadas porque no involucran solamente dos coordenadas, ya que tienen que incluir una descripción del ángulo con el que el cubo es lanzado y también la velocidad. El dado será pre-

decible si para la mayoría de los puntos de la imagen, cuando alteramos ligeramente las condiciones iniciales, el dado termina cayendo sobre la misma cara. Podemos pensar que la imagen está coloreada con seis colores, que corresponden a las seis caras del dado. La imagen será fractal si por más que la ampliamos siempre vemos regiones que contienen al menos dos colores. El dado es predecible si no vemos esta característica de los objetos fractales.

El modelo que consideró el equipo polaco supone que el dado está perfectamente equilibrado, como el que traje de Las Vegas. Resulta que puede ignorarse la resistencia del aire, porque influye muy poco sobre el dado cuando éste da vueltas por el aire. Cuando el dado choca con la mesa, se disipa cierta proporción de la energía de aquél, de modo que después de unos cuantos botes el dado pierde toda su energía cinética y se detiene.

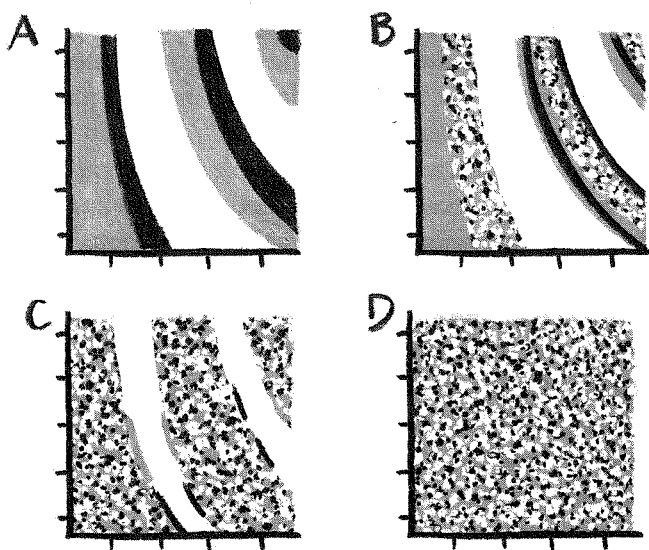
El rozamiento con la mesa es también crucial, ya que es probable que el dado se deslice en los primeros botes pero no en los últimos. Sin embargo, el modelo que exploró el equipo polaco supuso que la superficie no ofrece rozamiento, porque la dinámica resulta muy difícil de manejar cuando hay rozamiento. Así que imaginemos que arrojamós el dado sobre una pista de hielo.

Ya había escrito antes las ecuaciones, basadas en las leyes del movimiento de Newton, para la dinámica del dado mientras vuela por el aire. En manos del equipo polaco resultaron no ser tan complicadas. Son las ecuaciones para el cambio de dinámica tras el choque con la mesa las que resultan terribles: ocupan diez líneas en el artículo que escribieron.

El equipo descubrió que si la cantidad de energía disipada en el impacto contra la mesa es muy elevada, la gráfica del resultado del dado no presenta rasgos fractales. Esto significa que si uno puede fijar las condiciones iniciales con la precisión adecuada, el resultado de la tirada del dado es predecible.

ble y repetible. Esta predictibilidad implica que el dado aterrizará más de la mitad de las veces sobre la cara que estaba más abajo cuando éste se arrojó. Un dado que es equilibrado cuando está parado puede convertirse de hecho en un dado trucado cuando se pone en movimiento.

Sin embargo, cuanto más rígida sea la mesa, menos energía se disipará y más rebotará el dado, y se empezará a ver cómo surgen características fractales.



Al pasar de (A) a (D), la mesa disipa menos energía y, en consecuencia, el resultado de la tirada del dado presenta características más fractales.

Esta gráfica analiza lo que pasa al variar dos parámetros: la altura desde la que se lanza el dado y variaciones de la velocidad angular en torno a uno de los ejes. Cuanta menos energía se disipa en el choque contra la mesa, más caótico es el comportamiento resultante y más parece que el resultado de la tirada del dado está en manos de los dioses.

¿JUEGA DIOS A LOS DADOS?

¿Qué tal si volvemos al desafío de definir a Dios como todo aquello que no podemos conocer? La teoría del caos afirma que no podemos conocer el futuro de ciertos sistemas de ecuaciones porque son demasiado sensibles a las pequeñas inexactitudes. En el pasado los dioses no eran inteligencias sobrenaturales que vivían fuera del sistema, sino que eran los ríos, el viento, el fuego, la lava, cosas no predecibles ni controlables. Cosas en las que vivía el caos. Las matemáticas del siglo XX han revelado que estos antiguos dioses siguen con nosotros. Hay fenómenos naturales que nunca serán domesticados ni conocidos. La teoría del caos implica que nuestro futuro suele estar fuera del alcance de nuestro conocimiento a causa de lo mucho que depende del ajuste más o menos perfecto de lo que ocurre en el presente. Como nunca podemos tener un conocimiento perfecto del presente, la teoría del caos nos deniega el acceso al futuro. Al menos hasta que el futuro se convierte en presente.

Eso no quiere decir que todos los futuros sean imposibles de conocer. Con frecuencia nos encontramos en regiones que no son caóticas y las pequeñas fluctuaciones afectan mínimamente a los resultados. Por eso las matemáticas han sido tan formidables a la hora de ayudarnos a predecir y planificar. En estos casos tenemos conocimiento del futuro. Pero otras veces no disponemos del mismo control, y no por ello ese futuro desconocido dejará de tener un impacto en algún momento de nuestras vidas.

Algunos analistas religiosos que conocen bien la ciencia y que tratan de articular una explicación científica de cómo podría actuar sobre el mundo una inteligencia sobrenatural, han intentado usar, de un modo intrigante, la brecha que supone la teoría del caos como un terreno en el que podría actuar esta inteligencia para influir en el futuro.

Uno de estos científicos religiosos es el físico cuántico John Polkinghorne. Radicado en la universidad de Cambridge, es

una mente excepcional que ha combinado los rigores de una educación científica con los años de formación hasta ordenarse sacerdote anglicano. Me encontraré con él en persona en la tercera «frontera», en la que exploraré la imposibilidad de conocer inherente a su propia disciplina científica, la física cuántica. Polkinghorne también se ha interesado por el vacío de conocimiento que proporcionan las matemáticas de la teoría del caos, ya que supone una oportunidad para que su Dios pueda influir en el futuro de la humanidad.

Este científico ha propuesto que, por medio de las indeterminaciones implícitas en la teoría del caos, una inteligencia sobrenatural puede todavía actuar sin violar las leyes de la física. La teoría del caos dice que nunca podemos conocer una configuración con la precisión suficiente como para ejecutar ecuaciones deterministas, y por ello hay sitio en la visión de Polkinghorne para la intervención divina, con el fin de retocar las cosas de modo que sigan siendo consistentes con nuestros conocimientos parciales pero aun así tengan capacidad de influir en los resultados.

Polkinghorne se cuida bien de insistir en que el usar datos infinitesimales para producir cambios requiere una intervención holística de arriba abajo. No se trata de un Dios que resida en los pequeños detalles, pero sí necesariamente de un Dios omnisciente. Dado que la teoría del caos implica que incluso la localización de un electrón en el otro extremo del universo podría influir en todo el sistema, necesitamos tener un conocimiento holístico, completo, de todo el sistema—el universo entero—para poder dirigir las cosas. No podemos aislar con éxito una parte del universo y seguir teniendo esperanzas de hacer predicciones basándonos exclusivamente en esa parte del universo. Así que se requeriría un conocimiento del sistema entero para actuar por este resquicio sobre lo que es desconocido para nosotros.

La teoría del caos es determinista, de modo que éste no es un intento de usar la aleatoriedad de algo como la física cuán-

tica como medio para influir. El punto de vista de Polkinghorne sobre cómo cuadrar el círculo del determinismo e influir sobre el sistema es usar la brecha entre epistemología y ontología, entre lo que sabemos y lo que es cierto. Como no podemos conocer una descripción completa del estado del universo en este momento, esto significa que desde nuestra perspectiva no existe el determinismo. Hay muchas situaciones hipotéticas diferentes que coinciden con nuestra descripción imparcial de lo que sabemos actualmente sobre cómo está configurado el universo. El argumento de Polkinghorne es que esto proporciona a Dios en cualquier instante la oportunidad de intervenir y hacer que el sistema pase de una de estas situaciones hipotéticas a otra sin que nosotros nos demos cuenta del cambio. Pero, como hemos visto, la teoría del caos implica que estos pequeños cambios pueden sin embargo conducir a resultados tremendamente diferentes. Polkinghorne toma la precaución de afirmar que solamente se permiten intercambios entre sistemas en los que varía la información, no la energía. La regla aquí es no violar las reglas de la física. Como dice Polkinghorne: «La sucesión de las estaciones y la alternancia del día y la noche no pueden suspenderse».

Aunque pueda creerse que esto es bastante fantasioso (desde luego es lo que pienso yo), un principio parecido es probablemente la clave de nuestro sentido de protagonismo en el mundo. La cuestión del libre albedrío está vinculada en definitiva a cuestiones de una filosofía reduccionista. El libre albedrío describe la incapacidad de hacer, en la mayoría de los casos, algún tipo de reducción significativa a una visión atomista del mundo. Así que tiene sentido crear una descripción en la que tenemos libre albedrío porque eso es lo que parece en el plano de las interacciones humanas en el universo. Si las cosas fueran deterministas en un sentido obvio, con pocas variaciones ante pequeños cambios indetectables, no pensaríamos que gozamos de libre albedrío.

Resulta chocante que Newton, la persona que nos indujo

a creer en un universo mecánico determinista, también sintió que las ecuaciones dejaban sitio para que Dios interviniese. Escribió sobre su creencia de que Dios tendría que recomponer algunas veces el mundo, cuando parece que las cosas se desvían de su curso. Se enzarzó en una gran controversia con su rival matemático, el alemán Gottfried Leibniz, que no veía por qué Dios no habría de haber dispuesto todo perfectamente desde el principio:

Sir Isaac Newton y sus seguidores tienen también una opinión muy extraña en lo que se refiere a la obra de Dios. Según su doctrina, Dios Todopoderoso necesita dar cuerda a su reloj de vez en cuando: si no lo hace, se para. Por lo visto, no ha tenido la previsión suficiente para otorgarle movimiento perpetuo.

SOBRE LA FRONTERA DEL CAOS

Newton y sus ideas matemáticas me dieron la impresión de que podría conocer el futuro, de que podría acortar la espera y convertirlo en presente. La cantidad de veces que he oído la cita de Laplace sobre la posibilidad de saberlo todo en última instancia gracias a las ecuaciones del movimiento es una prueba del sentir general entre los científicos de que el universo es teóricamente cognoscible.

Las matemáticas del siglo xx revelaron que la teoría no se traduce necesariamente en la práctica. Aunque Laplace acierte cuando dice que el conocimiento completo del estado presente del universo, junto con las ecuaciones de las matemáticas, conducirían al conocimiento completo del futuro, nunca tendremos acceso a ese conocimiento completo. La revelación traumática de la teoría del caos en el siglo xx es que ni siquiera una buena aproximación a ese conocimiento ayuda mucho. Las trayectorias divergentes de la mesa de billar caótica significan que, como no podemos saber en qué trayectoria estamos, nuestro futuro no es predecible.

La teoría del caos implica que hay cosas que nunca podremos saber. Las ideas matemáticas en las que tanta fe he depositado de que me proporcionarían un conocimiento completo han acabado demostrando lo contrario. Pero la esperanza no está del todo perdida. Muchas veces las ecuaciones no son sensibles a pequeños cambios y entonces nos permiten realizar predicciones sobre el futuro. Al fin y al cabo, así es como se pudo posar un artefacto espacial sobre un cometa en movimiento. No sólo eso: como ilustran los trabajos de Bob May, las matemáticas pueden incluso ayudarnos a saber cuándo no podemos saber.

No obstante, un descubrimiento de finales del siglo xx cuestiona incluso el postulado básico de Laplace sobre la predictibilidad teórica del futuro. Al principio de la década de 1990, un estudiante de doctorado llamado Zhihong Xia probó que hay una manera de configurar cinco planetas de modo que al soltarlos, la atracción gravitatoria combinada haga que uno de los planetas salga disparado y adquiera una velocidad infinita en un período finito de tiempo. Ningún planeta choca con otro, pero aún así las ecuaciones han imprimido en ellos este resultado tan catastrófico para los habitantes del infeliz planeta. Las ecuaciones no son capaces de hacer ninguna predicción de lo que pasa a partir de ese momento.

El descubrimiento de Xia es un desafío fundamental a la visión de Laplace, que postula que las ecuaciones de Newton implican que podemos conocer el futuro si tenemos un conocimiento completo del presente, porque no hay ninguna predicción, incluso dentro del ámbito de las ecuaciones de Newton, de lo que le pueda pasar al planeta desdichado en cuanto alcanza una velocidad infinita. La teoría topa con una singularidad en este punto, más allá de la cual no tiene sentido la predicción. Como veremos en «fronteras» posteriores, consideraciones procedentes de la teoría de la relatividad limitan la realización física de esta singularidad, ya que

el planeta desgraciado acabará alcanzando el límite cósmico de velocidad, que es la velocidad de la luz, y en esta situación se sabe que la teoría de Newton es una mera aproximación de la realidad. Aun así, esta singularidad pone de manifiesto que las ecuaciones no son suficientes para conocer el futuro.

Es llamativo escuchar a Laplace en su lecho de muerte. Al ver que se aproximaba su propia singularidad y que le quedaba solamente una cantidad finita de tiempo antes de irse, él también confesó: «Lo que sabemos es poco, y lo que ignoramos, inmenso». El siglo XX reveló que, aunque sepamos mucho, nuestra ignorancia seguirá siendo inmensa.

Sin embargo, resulta que no sólo es imposible conocer el comportamiento visible de los planetas y del dado. Si sondeamos a fondo el dado de casino, descubriremos otro desafío a la creencia de Laplace en un universo mecánico determinista. Cuando los científicos empezaron a escrutar el interior del dado para comprender de qué está hecho, descubrieron que conocer la posición y el movimiento de las partículas que constituyen el dado no es ni siquiera teóricamente posible. Como desvelaremos en las dos «fronteras» siguientes, podría en realidad ser un juego de dados el que controla el comportamiento de las propias partículas que constituyen mi dado rojo de Las Vegas.

SEGUNDA FRONTERA:
EL VIOLONCHELO

Cada cual considera que los límites de su propia visión son los límites del mundo.

ARTHUR SCHOPENHAUER

Recuerdo que, al comenzar los estudios de secundaria, el profesor de música preguntó en clase si había alguien que quisiera aprender a tocar un instrumento. Fuimos tres los que levantamos la mano. El profesor nos llevó al armario del almacén a ver qué instrumentos había disponibles. Allí no hallamos otra cosa que tres trompetas apiladas. «Me parece que os va a tocar aprender trompeta», dijo.

No me arrepiento de aquella elección (aunque no lo fuera realmente). Me lo pasé muy bien tocando en la banda municipal y vacilando con los músicos de viento de la orquesta del condado cuando ensayábamos cómo llevar el tempo para entrar. Pero solía mirar con un poco de envidia a los músicos de cuerda, que parecía que estaban tocando todo el tiempo, y que se quedaban siempre con las mejores melodías. Unos años después, en una entrevista radiofónica, me preguntaron qué otro instrumento escogería, si tuviera la oportunidad de aprender a tocar uno más, y qué pieza aspiraría a interpretar con él: «El violonchelo. Las suites de Bach», contesté.

Desde entonces una pregunta me ronda la cabeza: ¿sería capaz de aprender a tocar esas maravillosas suites para el violonchelo? Quizá era ya demasiado tarde para intentar adquirir estas nuevas destrezas, pero necesitaba saberlo. Así que me compré un violonchelo.

Descansa detrás de mí mientras escribo sobre las tentativas de predecir el resultado del dado. Cuando necesito tomarme un respiro y dejar de lado un rato el análisis de las ecuacio-

nes que controlan la caída del dado rojo sobre la mesa, destrozo una de las gigas de la primera suite para violonchelo. Siento cómo Bach se revuelve en la tumba, pero yo disfruto.

Una de las cosas divertidas del violonchelo es la posibilidad de deslizar el dedo a lo largo de las cuerdas para crear un *glissando* continuo de notas. Eso no lo puedo hacer con la trompeta, que es un instrumento de notas discretas, correspondientes a las distintas combinaciones de los dedos que actúan. Resulta que esta tensión entre el *glissando* continuo del violonchelo y las notas discretas de la trompeta es relevante en mis intentos de predecir el comportamiento del dado.

AL MIRAR MÁS DE CERCA

Para predecir cómo podría aterrizar el dado necesito saber de qué está hecho mi cubo. Un acetato más denso en uno de los vértices del cubo favorecería a una de las caras del cubo con respecto a las otras. De modo que si vamos a tratar de aplicar las leyes de Newton al dado cuando éste voltea por el aire, necesitamos saber cómo está ensamblado. ¿Se trata de una estructura continua o, si miramos más de cerca, está hecha de piezas sueltas?

Si acepto los límites de mi propia visión, como sugiere que tiendo a hacer la cita de Schopenhauer que abre esta «frontera», entonces no puedo ver más que el brillante acetato rojo con el que está fabricado el dado. Pero con un microscopio óptico puedo aumentar la imagen del dado en un factor de 1.500, lo cual lo convierte en algo del tamaño de un edificio grande. Si escrutamos el interior de este enorme dado, seguiremos sin descubrir gran cosa de los secretos de cómo está hecho. Todo seguirá pareciendo bastante liso y continuo.

En el siglo xx, los microscopios que explotan diferentes tramos del espectro electromagnético han permitido a los científicos crear imágenes que amplían las cosas 1.000 veces

más que los microscopios ópticos. Ahora el dado se extenderá de un extremo al otro de Londres. Con esta ampliación el dado empieza a parecer más granulado. La sensación de una estructura continua deja paso a algo más discreto. Los microscopios electrónicos actuales nos permiten ampliar la imagen otras 10 veces más, y en este punto podríamos empezar a ver los átomos de carbono y de oxígeno, que sabemos que son algunos de los constituyentes del acetato que se ha utilizado para fabricar el dado.

Lo intrigante es que los científicos ya habían formulado una visión atomista de la materia antes de que se pudieran ver realmente estos átomos con los microscopios modernos que hay en los laboratorios a los que se llega desde el departamento de matemáticas sólo con cruzar la calle. Y el mejor instrumento para saber de qué está hecho el dado es una combinación de una perspectiva matemática y teórica con una visión física.

Sin embargo, los átomos, como éstos de oxígeno y carbono, resultaron no ser tan atómicos como su nombre sugiere. Más allá de la estructura atómica desvelada por los actuales microscopios electrónicos, sabemos que cuentan con más estructura interna. Los átomos dan paso a los electrones, protones y neutrones. Los protones y los neutrones dejan paso a su vez a los quarks. En 2013, los microscopios cuánticos llegaron a captar electrones que orbitaban en torno al núcleo de un átomo de hidrógeno. Pero ¿hay un límite teórico que marque hasta dónde puedo profundizar en las interioridades del dado?

¿Qué ocurre, por ejemplo, si tomamos el dado y empezamos a partirlo sucesivamente en dos? ¿Hasta dónde podríamos llegar? La parte matemática de mi yo dice: no hay problema. Si tengo un número puedo dividirlo siempre por dos:

$$1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16} \dots$$

Matemáticamente, no hay ningún punto en el que deba detenerme. No obstante, si trato de hacer lo mismo con el dado físico que tengo sobre la mesa y lo parto en dos, luego en dos otra vez, y así sucesivamente, ¿hasta cuándo podré seguir haciéndolo?

La tensión entre la naturaleza continua y la naturaleza discreta de la materia, entre lo que es posible matemáticamente y los límites establecidos por la realidad física, se ha mantenido con tenacidad durante milenios. ¿Baila el universo al ritmo de mi trompeta o vibra acorde con el *glissando* de mi violonchelo?

LA MÚSICA DE LAS ESFERAS

¿Cómo llegué yo personalmente a saber sobre estos electrones y quarks que dicen que son los últimos estratos del dado? Nunca los he visto. Si me pregunto en serio cómo sé algo de ellos, la respuesta es que me han hablado y he leído tantas veces acerca de ellos que he olvidado de hecho por qué o cómo lo sé. O, pensándolo mejor, ¿acaso alguien me dijo alguna vez cómo se sabe todo esto? ¿Se parece un poco al modo mediante el que sabemos que el Everest es la montaña más alta? Esto lo sé solamente porque me lo han dicho muchas veces. Así que antes de preguntar si hay algo más allá de este estrato, necesito saber cómo se llega a estos constituyentes básicos.

Leyendo textos históricos, me ha sorprendido que apenas han pasado cien años desde que se consiguieron pruebas evidentes del hecho de que las cosas, como mi dado, están hechas de constituyentes básicos discretos llamados átomos y no son estructuras continuas. Aunque éste es un descubrimiento relativamente reciente, el presentimiento de que esto era así tiene miles de años de antigüedad. En la India se creía que la materia estaba formada por átomos básicos que daban cuenta del sabor, del olor, del color y del tacto. Dividieron los átomos en dos tipos: los que eran infinitamente pequeños y no ocupaban espacio, y los que eran «gruesos» y sí lo ocupa-

ban. Esta teoría resultó ser sumamente presciente, como veremos cuando explique el modelo actual de la materia.

En Occidente fueron los antiguos griegos los que primero propusieron una filosofía atomista de la naturaleza, que defendía el punto de vista reduccionista que propugna que la realidad física puede reducirse a unidades fundamentales constituyentes de toda la materia. Estos átomos no podían descomponerse en piezas más pequeñas, y sus propiedades no dependían de ninguna otra estructura interna compleja. Una de las semillas de esta creencia en un universo compuesto por constituyentes básicos indivisibles fue la filosofía pitagórica, que sostenía que los números son la clave que explica los secretos del universo.

La certeza del poder de los números enteros tuvo sus orígenes en este descubrimiento notable, atribuido a Pitágoras: el número es la base de la armonía musical que explotan tanto el violonchelo como la trompeta. Cuenta la historia que la inspiración le vino cuando pasó al lado de una herrería y oyó cómo los martillos generaban una bonita combinación de notas armoniosas. (No podemos estar seguros de que esta historia y otras parecidas que se cuentan de Pitágoras sea cierta, y ni siquiera de que Pitágoras existiera y no fuera una invención de generaciones posteriores que resultó útil para promocionar nuevas ideas).

La historia continúa y cuenta que cuando llegó a casa se puso a experimentar con las notas producidas por un instrumento de cuerda. Partiendo de la cuerda vibrante de mi violonchelo, puedo producir una sucesión continua de notas desplazando gradualmente mi dedo hacia el puente, emitiendo un sonido que se llama *glissando* (aunque la cuestión de si así se produce realmente o no una sucesión continua de notas será abordada en la próxima «frontera»). Si me detengo en las posiciones que producen notas que parecen armoniosas cuando se combinan con el sonido que emite por su cuenta la cuerda vibrante, resulta que las longitudes de las cuerdas están en una

proporción la una con respecto a la otra que se expresa como cociente perfecto de dos números enteros simples.

Por ejemplo, si coloco el dedo en el punto medio de la cuerda vibrante, obtengo una nota que suena muy parecida a la nota de partida. El intervalo se llama octava, y la nota suena tan parecida a la que emite la cuerda que vibra libremente que en la notación musical que surgió ambas recibieron el mismo nombre. Si coloco el dedo a un tercio de distancia del clavijero del violonchelo, se consigue una nota que suena de modo especialmente armonioso al combinarla con la nota que emite la cuerda cuando vibra libremente. Dicho intervalo se llama quinta perfecta, y en ella nuestro cerebro responde al reconocimiento subliminal de esta relación entre las longitudes de onda de las dos notas, que se expresa con números enteros.

Al descubrir que los números enteros anidaban en el corazón de la armonía, los pitagóricos empezaron a construir un modelo del universo en el que estos números enteros eran los elementos constituyentes básicos de todo lo que veían u oían a su alrededor. La cosmología griega estuvo dominada por la idea de la armonía matemática en los cielos. Se creía que las órbitas de los planetas mantenían una relación matemática perfecta entre ellas, y esto dio origen a la idea de la música de las esferas.

También se creía—y esto es más importante para comprender la estructura del dado—que los números discretos, y no un continuo *glissando*, eran la clave para entender lo que constituía la materia. Los pitagóricos propusieron la idea de los átomos fundamentales que, como los números, podían sumarse para generar nueva materia. El filósofo y matemático griego Platón desarrolló la filosofía pitagórica y convirtió a los átomos en verdaderas piezas discretas de la geometría.

Platón pensaba que los átomos eran verdaderamente entes matemáticos: triángulos y cuadrados. Éstos eran los constituyentes básicos de las formas que, según él, formaban la clave de los elementos de la química griega: el fuego, tierra,

aire y agua. Platón creía que cada elemento poseía su propia forma matemática tridimensional.

El fuego tenía la forma de una pirámide de base triangular, o tetraedro, hecha de cuatro triángulos equiláteros. La tierra tenía forma de cubo, como mi dado de Las Vegas. El aire estaba hecho con formas que se llaman octaedros, contruidos con 8 triángulos equiláteros, que se obtienen pegando las bases de dos pirámides iguales de base cuadrada. Finalmente, el agua correspondía al icosaedro, una forma hecha con 20 triángulos equiláteros. Platón creía que la interacción geométrica entre estas formas básicas era la que generaba la química de los elementos.

La visión atomista de la materia no fue universalmente aceptada en el mundo antiguo. Al fin y al cabo, no existía ninguna prueba de la existencia de estos entes indivisibles. Era imposible verlos. Aristóteles fue uno de los que no creyeron en la idea de los átomos fundamentales. Él pensó que los elementos eran de naturaleza continua, que uno podría teóricamente dividir una y otra vez el dado en piezas cada vez más pequeñas. Creyó que el fuego, la tierra, el aire y el agua eran elementales en el sentido de que no podían fragmentarse en «cuerpos de forma diferente». Si uno continúa dividiendo, se sigue teniendo siempre agua o aire. Si consideramos un vaso de agua, a simple vista nos parece una estructura continua que teóricamente puede ser fraccionada indefinidamente. Si tomamos un trozo de goma y lo estiramos suavemente, parece que exhibe una naturaleza continua. Estaba así dispuesto ya el escenario para la batalla entre el modelo continuo y el modelo discreto de la materia. El *glissando* en oposición a las notas discretas de la escala musical. El violonchelo frente a la trompeta.

Lo más intrigante es que fue precisamente un descubrimiento atribuido a los pitagóricos el que amenazaría la visión atomista e inclinaría la balanza durante muchos años a favor de la creencia de que la materia podía ser subdividida indefinidamente.

Desde el punto de vista atomista si dibujamos dos líneas sobre un papel, cada una la formarán cierto número de estos átomos indivisibles, con lo que sus longitudes estarían en una proporción dada por dos números enteros, correspondientes al número de átomos que hay en cada línea. Pero resultó que las cosas no eran tan disciplinadas. De hecho, el teorema del mismo Pitágoras sobre los triángulos rectángulos fue el que reveló que el mundo de la geometría podía dar lugar a líneas cuyas longitudes relativas no podían ser captadas por fracciones.

Las dimensiones de mi dado ocultan un desafío a la visión atomista de la naturaleza. Tomemos dos de las aristas del cubo, que forman un ángulo de 90 grados. Ambas tienen la misma longitud. Consideremos ahora la diagonal, a lo largo de la cara del cubo, que completa el triángulo rectángulo determinado por las dos aristas de igual longitud. ¿Cuánto mide esta diagonal en relación a los otros dos lados más cortos?

El teorema de Pitágoras sobre los triángulos rectángulos dice que el cuadrado de la longitud de la diagonal es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados más cortos. Si establezco que la longitud de los lados del dado es igual a 1, el teorema de Pitágoras implica que la longitud de la diagonal de la cara es un número que elevado al cuadrado es igual a 2. ¿Y cuál es este número?

Los babilonios quedaron cautivados por el desafío de calcular esta longitud. Una tablilla de arcilla del período babilónico arcaico (1800-1600 a. C.) que se conserva en la universidad de Yale contiene una estimación de esta distancia. Escrita usando el sistema sexagesimal o de base 60, nos dice que la distancia es igual a:

$$1 + \frac{24}{60} + \frac{51}{60^2} + \frac{10}{60^3} = \frac{30,547}{21,600}$$

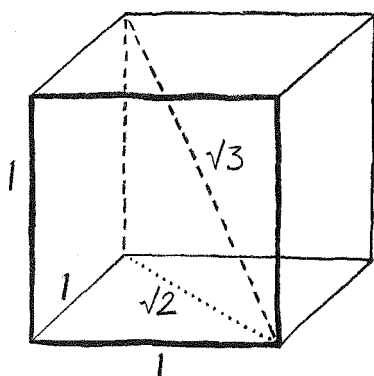
que en notación decimal corresponde a $1,41421296296\dots$, donde el 296 se repite infinitas veces. Lo anterior es cierto para todas las fracciones: cuando se escriben con decimales, éstos se repiten a partir de un punto. En realidad, cualquier desarrollo decimal que se repite indefinidamente puede siempre escribirse como una fracción. El cálculo babilónico es toda una hazaña. Es correcto hasta seis decimales. Pero al elevar al cuadrado esta fracción no sale exactamente 2. Lo que descubrieron los antiguos griegos es que, por más que se esforzaran los escribas babilonios, al elevar al cuadrado sus fracciones nunca saldría 2.

Se atribuye a Hipaso, uno de los discípulos de Pitágoras, el descubrimiento de que los babilonios estaban condenados al fracaso. Probó que la longitud de la diagonal considerada, que atraviesa una cara del dado, nunca podrá expresarse como una fracción.

El teorema de Pitágoras sobre los triángulos rectángulos implicaba que este lado largo tenía una longitud igual a la longitud de cualquiera de los lados pequeños multiplicada por la raíz cuadrada de 2. Pero Hipaso fue capaz de probar que no había ninguna fracción cuyo cuadrado fuera exactamente 2. La prueba utiliza una de las herramientas clásicas del arsenal matemático: la demostración por contradicción. Hipaso empezó por suponer que existía una fracción cuyo cuadrado era igual a 2. Mediante una hábil manipulación, esto conducía siempre a la afirmación contradictoria de que había un número que era a la vez par e impar. El único modo de resolver esta contradicción era admitir que la suposición original tenía que ser falsa: no puede haber ninguna fracción cuyo cuadrado sea 2.

Supuestamente, sus correligionarios pitagóricos se sintieron conmovidos por el descubrimiento de que sus hermosos triángulos rectángulos pudieran producir esas longitudes tan poco armoniosas. La secta hizo voto de silencio, pero cuenta la historia que cuando Hipaso anunció el des-

cubrimiento, apareció ahogado en el mar por desvelar esta disarmonía del mundo físico. Sin embargo, no fue nada fácil silenciar a estos números, llamados irracionales por no ser razones entre dos números enteros.



Longitudes irracionales dentro del cubo.

Tengo ciertamente la sensación de que esta longitud existe. Puedo verla reflejada en una regla colocada a lo largo del lado largo del triángulo. Es la distancia que hay entre dos vértices opuestos de cualquier cara del dado. Pero si trato de escribir el número como un decimal infinito, no acabo nunca de aprehenderlo. Empieza por 1,414213562... y así continúa hasta el infinito sin repetirse.

EXUBERANCIA IRRACIONAL

El descubrimiento hecho por los antiguos griegos de que existían longitudes que no podían expresarse como cociente de números enteros condujo a los matemáticos de entonces a crear nuevas matemáticas, las matemáticas de los números irracionales, con el fin de medir verdaderamente el universo. Otras longitudes básicas como π , la circunferencia de un círculo de diámetro unidad, resultaron también ser irracionales.

nales e imposibles de captar por tanto con fracciones de números enteros. Aunque los antiguos griegos ya sabían hace dos mil años que la raíz cuadrada de 2 era irracional, hubo que esperar hasta el siglo XVIII para que el matemático suizo Johann Heinrich Lambert probara que no existe ninguna fracción que capte el número π .

A pesar de mi aversión hacia las cosas que no podemos saber, la lectura de textos que hablaban de los números que no podían captarse usando cocientes de números enteros marcó uno de los momentos decisivos en los que se desencadenó mi amor por las matemáticas. El mismo año que el profesor de música me dio a conocer la trompeta que sacó del armario del almacén, el de matemáticas puso a mi alcance la demostración de la irracionalidad de la raíz cuadrada de 2. La prueba se encontraba en uno de los libros que me recomendó este profesor para encender en mí el fuego de la pasión por las matemáticas. El método funcionó. Me impresionó descubrir que se podía probar con un argumento lógico finito que solamente el infinito tenía la capacidad de articular la medida de la longitud de la diagonal de un cuadrado. Si no se podía escribir cuánto valía esta longitud, lo siguiente menos malo sería saber al menos el porqué.

Después de leer aquella demostración cuando era estudiante de secundaria, he ido aprendiendo otros caminos alternativos para explorar estos números irracionales—de modo que a lo mejor son números que podemos conocer—. Hay expresiones infinitas con patrones que hacen que el número sea menos misterioso. Por ejemplo:

$$\sqrt{2} = 2 \times \left(1 - \frac{1}{3}\right) \times \left(1 + \frac{1}{5}\right) \times \left(1 - \frac{1}{7}\right) \times \left(1 + \frac{1}{9}\right) \times \dots$$

o

$$\pi = 4 \times \left(1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \dots\right)$$

El descubrimiento de tales expresiones impulsa a estos números irracionales hacia el mundo de lo conocido. Una fracción es un número cuyo desarrollo decimal se repite a partir de cierto punto. ¿No podríamos considerar estas expresiones como un patrón, no muy distinto del patrón repetitivo del desarrollo decimal de una fracción? El patrón repetitivo de una fracción implica que existen dos números cuyo cociente capta el número, mientras que en el caso de raíz de 2 y de π tenemos que resignarnos a recurrir a infinitos números para fijar estas longitudes.

Por supuesto, para cualquier aplicación práctica de estos números, podríamos arreglarnos con una aproximación dada por una fracción. La mayoría de los ingenieros se conforman con usar la aproximación $22/7$ para el número π , descubierta por Arquímedes aproximando una circunferencia con un polígono de 96 lados. De hecho, solamente se necesitan 39 dígitos de π para poder calcular la circunferencia de un círculo del tamaño del universo observable con una precisión comparable al tamaño de un átomo de hidrógeno. Existe incluso una fórmula que puede proporcionarme el dígito que ocupa el lugar un millón en el desarrollo decimal de π sin necesidad de tener que calcular todos los dígitos intermedios. Saber este dato no es que me quite el sueño. Pero esta fórmula solamente nos dará siempre un conocimiento finito de un número que precisa infinitas cifras para quedar plenamente definido.

El descubrimiento de estos números parecía implicar una divisibilidad indefinida del espacio. Solamente dividiendo indefinidamente el espacio podríamos medir las dimensiones precisas de un sencillo cubo. Este descubrimiento implicó que en Occidente la visión aristotélica de la materia dominara hasta el Renacimiento.

Con la percepción de la ciencia de la generación de Newton y las siguientes, la corriente mudó a favor de la visión de un universo hecho efectivamente a base de elementos constituyentes básicos. Robert Boyle, contemporáneo de Newton, fue seguramente el primero que puso en duda la visión aristotélica de la materia, que había sido la dominante durante más de dos mil años. En su libro *El químico escéptico*, Boyle desafió la idea de que la materia estuviera formada por cuatro elementos: fuego, tierra, aire y agua. Éstos podrían ser buenas descripciones de los estados de la materia, pero no de sus constituyentes.

Lo que hizo entonces fue defender una nueva lista de elementos químicos. Y no sólo eso, sino que afirmó algo que en su tiempo podía ser considerado totalmente herético. Sostuvo que estos elementos serían cuerpos diminutos o átomos que solamente diferirían entre sí en «tamaño, forma, textura y movimiento». Estas ideas fueron consideradas peligrosas desde el punto de vista teológico: una visión materialista y atea del mundo a los ojos de la Iglesia, que siempre había apoyado la visión aristotélica. Algunos han proclamado a Boyle como el Galileo de la revolución química.

Aunque Newton aceptaría la propuesta de Boyle de un mundo material hecho de unidades indivisibles, las herramientas matemáticas que Newton desarrolló a la vez que Boyle presentaba su trabajo se basaban fundamentalmente en la idea de que el espacio y el tiempo son indefinidamente divisibles. El cálculo que le permitía a uno registrar una instantánea de un universo en flujo constante tenía sentido solamente como un proceso en el que el espacio es segmentado en piezas cada vez más pequeñas y en el que luego se interpreta lo que pasaría en el límite, cuando las piezas se hacen infinitamente pequeñas.

La cuestión de la divisibilidad indefinida del tiempo y del espacio había alimentado los debates filosóficos desde que

el antiguo pensador griego Zenón de Elea presentó algunas paradojas que parecían surgir de esta fragmentación del espacio. Por ejemplo, Zenón propuso que una flecha no puede llegar nunca al blanco, porque primero ha de cubrir la mitad de la distancia que lo separa de él, luego la mitad de esta mitad, después la mitad de la mitad de la mitad y así sucesivamente, de modo que tiene que realizar un número infinito de recorridos antes de llegar al blanco. El éxito del cálculo de Newton reabrió el debate. Estaban también los que consideraban esta divisibilidad infinita casi herética.

El obispo Berkeley dedicó todo un libro, titulado *El analista*, a argumentar que el intento de dar un sentido a la operación de dividir por cero era absurdo, lo cual quedaba ya claro en el subtítulo: «Dedicado a un matemático infiel».

Si bien la mayoría de los matemáticos incrédulos se aferraron rápidamente al poder del cálculo, otros descubrimientos de Newton apoyaban la opinión de que, aunque el tiempo y el espacio pudieran dividirse indefinidamente, no ocurría así con la materia. Su idea de un mundo hecho de materia indivisible se acabaría convirtiendo en la teoría predominante del universo. Pero en aquel punto era todavía una teoría que carecía de muchas pruebas a su favor. Su teoría de las fuerzas que actuaban sobre objetos grandes como planetas o manzanas había tenido tanto éxito que Newton creyó que si las ideas funcionaban a escalas muy grandes o medianas, también lo harían a escalas muy pequeñas. ¿Por qué iba a haber un cambio en el proceso mediante el cual las leyes del movimiento dictan el comportamiento del universo cuando miramos más de cerca el dado? El éxito de su cálculo cuando se aplica al movimiento de los planetas dependía de considerarlos como simples puntos, con la masa concentrada en el punto correspondiente al centro de gravedad del planeta en cuestión. Era posible que toda la materia consistiera de partículas como minúsculos planetas cuyo comportamiento estaría determinado por sus leyes del movimiento. En los

Principia defendió su creencia de que, aplicando sus ideas a estas partículas individuales, uno podría predecir el comportamiento de todas las cosas materiales.

La teoría de la luz de Newton también contribuyó a la creciente sensación de que una perspectiva atomista era la más apropiada para comprender el mundo. La interpretación de la luz mediante partículas parecía el modo más sencillo de describir los fenómenos que registró en el libro que tituló *Óptica*. La luz se reflejaba de un modo que parecía imitar el comportamiento de una bola de billar cuando rebota en el borde de la mesa. Pero, desde un punto de vista científico, no había ninguna prueba empírica para su modelo de un universo hecho de partículas indivisibles.

Ni siquiera con los microscopios, que empezaron a aparecer en el siglo XVII, podía verse nada que justificase este modelo atomista. Aunque se pudieran ver objetos discretos, no se podía probar nada sobre su indivisibilidad. Pero podemos juzgar que el viento estaba cambiando gracias al hecho de que la visión atomista de la materia se abrió paso a través de la cultura popular de aquel tiempo. La «Oda a santa Cecilia» de Nicholas Brady, a la que Purcell puso música en 1691, habla de semillas de la materia:

Alma del mundo, inspirados por ti se unen
las discordantes semillas de la materia,
pues ataste los átomos dispersos que,
unidos por las leyes de la verdadera proporción,
constituyeron de diversas partes una sola y perfecta armonía.

La mejor prueba a favor de la visión atomista de la materia llegó cien años después con los experimentos que mostraban cómo se combinaba la materia para producir nuevos materiales. Y estas combinaciones exhibían una plena armonía, como había sugerido Brady.

La obra del químico inglés John Dalton, a principios del siglo XIX, fue la que proporcionó las primeras justificaciones experimentales reales de la idea de que la materia está hecha de átomos indivisibles. Su descubrimiento de que los compuestos parecían estar hechos de sustancias que se combinaban siguiendo unas proporciones fijas expresadas en números enteros fue un gran avance, que condujo al consenso en el mundo científico de que estas sustancias venían dadas realmente en paquetes discretos.

Por ejemplo: «El oxígeno puede combinarse con una cierta porción de nitrógeno o con el doble de dicha porción, pero con ninguna otra cantidad intermedia». Esto ciertamente no constituía una prueba de que la materia fuera discreta, y no era lo suficientemente rotundo como para tumbar las creencias de los que defendían un modelo continuo de la materia, pero resultaba bastante sugestivo. Tenía que haber alguna explicación que aclarase por qué estas sustancias se combinaban así.

La notación que se desarrolló para expresar estas reacciones favorecía el punto de vista atomista. La combinación de nitrógeno y oxígeno podía expresarse algebraicamente como $N + O$ o como $N + 2O$. No había nada a medio camino entre ellas. Parecía que todos los compuestos respondían a proporciones que eran cocientes de números enteros. Por ejemplo, el sulfuro de aluminio estaba dado algebraicamente por $2Al + 3S = Al_2 S_3$, elementos que se combinaban en una proporción de 2 a 3. Los elementos nunca se combinaban siguiendo una relación que no estuviese dada por números enteros. Era una especie de armonía musical que anidaba en el núcleo del mundo químico. La música de las minúsculas esferas.

El científico ruso Dmitri Mendeléyev es recordado por haber colocado esta lista de elementos moleculares de tal forma que empezó a vislumbrarse un patrón, basado en los núme-

ros enteros y en el recuento. Parecía que resurgía la creencia pitagórica en el poder de los números. Como otros científicos antes que él, Mendeléyev dispuso los elementos en orden creciente según su peso relativo, pero vio que para descubrir los patrones que empezaba a intuir, tenía que ser flexible.

Había escrito los elementos conocidos en tarjetas y los combinaba continuamente sobre su mesa en un juego de paciencia química, tratando de obligarles a desvelar sus secretos. Pero nada funcionaba. Se estaba volviendo loco. Finalmente se derrumbó de agotamiento y el secreto surgió en un sueño que, al despertar, le proporcionó la clave para disponer las tarjetas. Uno de los aspectos importantes que condujeron a la ordenación conveniente de los elementos fue su convicción de que era preciso dejar algunos huecos, o sea, que faltaban algunas de las cartas del mazo.

La clave para la ordenación era lo que se llamó el número atómico, que dependía del número de protones que había en el núcleo y no de la combinación de protones y neutrones, que era la que daba el peso completo del elemento. Pero como nadie tenía todavía ninguna pista sobre estos constituyentes más pequeños, a Mendeléyev no le quedó otra opción que especular sobre las causas subyacentes de esta ordenación.

Era un poco como reconocer que un mazo de cartas convencionales puede desplegarse siguiendo los palos, pero también que al hacerlo van apareciendo cartas con los mismos valores. Los elementos parecían obedecer a una periodicidad de período ocho, de modo que un elemento y el que ocupaba el lugar octavo a partir de él parecían compartir propiedades muy parecidas. El octavo a partir del litio era el sodio y el octavo a partir de éste el potasio. Todos ellos metales blandos, brillantes y muy reactivos. Patrones parecidos casaban entre sí a gases con propiedades semejantes.

Esta regla basada en el ocho ya había sido observada antes del avance innovador propuesto por Mendeléyev. Se llamaba

la ley de las octavas. Fue comparada con la octava musical: si interpretamos las ocho notas de una escala mayor en el violonchelo, las notas inicial y final suenan muy parecidas y reciben por ello el mismo nombre. Cuando su promotor original John Newlands propuso esta ley de las octavas, levantó sonoras carcajadas en la Sociedad Real. «Cualquier día va a decirnos que los elementos se comprenden mejor cuando se ordenan por orden alfabético», comentó jocosamente uno de los académicos. La ordenación de Mendeléyev confirmó en cierta medida la veracidad de la ley de las octavas. Esta idea de que hay patrones repetitivos o periódicos condujo a llamar tabla periódica al ordenamiento ideado por Mendeléyev.

La genialidad de Mendeléyev fue concebir que, si en algunos casos los elementos no concordaban del todo bien, eso podría indicar que faltaba algún elemento. Detectar esos huecos que presentaba la tabla fue probablemente su contribución más penetrante. El hecho de que había un vacío en el puesto trigésimo primero de la tabla, por ejemplo, le llevó a predecir en 1871 la existencia y las propiedades de una nueva sustancia que recibiría más tarde el nombre de galio. Cuatro años después el químico francés Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran aisló las primeras muestras de este nuevo átomo, vaticinado gracias a los patrones matemáticos descubiertos por Mendeléyev.

RECETA PARA FABRICAR UN DADO

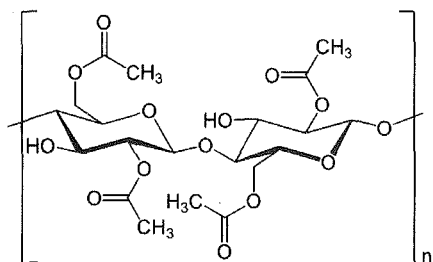
Teníamos ya una lista de los átomos que supuestamente constituían toda la materia. Por ejemplo, mi dado es una combinación de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno que forman una estructura llamada acetato de celulosa. Mi propio cuerpo está hecho en su mayor parte de estos mismos átomos, pero ensamblados en estructuras diferentes. El acetato de celulosa es una estructura homogénea en la que no se forman burbujas, lo que la hace apropiada para construir dados

bien equilibrados. Los dados más antiguos estaban fabricados con un tipo de nitrato de celulosa confeccionado por John Wesley Hyatt en 1868. Su cóctel de ácido nítrico, ácido sulfúrico, fibra de algodón y alcanfor produjo una sustancia impresionante, con gran resistencia a la tracción y a prueba del agua, los aceites e incluso los ácidos diluidos.

El hermano de Hyatt la llamó celuloide y se convirtió en una opción muy rentable para la confección de objetos que antes se fabricaban tallando marfil o cuerno. Las bolas de billar, los cuellos desmontables, las teclas de piano e incluso mi dado se fabricaron con este plástico sintético.

Los dados industriales usuales a principios del siglo xx estaban hechos de nitrato de celulosa, pero después de unas décadas de uso acababan cristalizándose y descomponiéndose de modo casi instantáneo, se desmenuzaban y liberaban ácido nítrico en estado gaseoso.

Los auténticos dados de coleccionista de Las Vegas son los que se fabricaron con nitrato de celulosa a finales de la década de los cuarenta, pero evitando esa futura cristalización. Mi dado no va a sufrir ese destino. He aquí un esquema que muestra cómo están distribuidos los átomos en el interior de mi dado:



La identificación de estos elementos no era una prueba del modelo discreto de la materia. No había ninguna razón por la cual esta descripción de los constituyentes del dado no

podiera ser una mera fórmula que explicase cómo se combina una estructura continua. Aunque los químicos se inclinaban hacia una visión atomista del universo, en la comunidad de físicos la situación era bien distinta. Aquellos que creían en modelos atomistas de la materia, como el físico alemán Ludwig Boltzmann, provocaban la risa en los laboratorios.

Boltzmann defendía que esta teoría atomista era una poderosa herramienta para interpretar el concepto de calor basado en la idea de que un gas está hecho de moléculas diminutas que chocan unas con otras en una especie de descomunal juego de microbillar. El calor sería simplemente la energía cinética combinada de estas minúsculas bolas en movimiento. Usando este modelo, junto con ideas de probabilidad y estadística, fue capaz de explicar con éxito el comportamiento de un gas a escala global. Pero la mayoría de los físicos seguían muy comprometidos con una visión continua de la materia y contemplaban con displicencia las ideas de Boltzmann.

Boltzmann fue ridiculizado de tal modo que se vio forzado a renunciar a su creencia de que esta teoría de la materia basada en bolas de billar representaba una descripción verídica de la realidad y a adoptar la postura de referirse a ella como si fuera un mero modelo heurístico, si quería que sus ideas llegaran a la imprenta. Ernst Mach, su gran contrincante en el debate sobre la realidad de los átomos, llegó a declarar en tono de burla: «¿Acaso ha visto usted alguna vez un átomo?».

Boltzmann vivió asolado por oleadas de depresión, y existen pruebas de que sufría de hecho un trastorno bipolar. Se cree que el rechazo de sus ideas en la comunidad científica contribuyó a generar la depresión que sufrió en 1906 y que le llevó a ahorcarse durante unas vacaciones con su familia en Trieste, mientras su mujer y su hija se bañaban en el mar.

Fue un final trágico, y más teniendo en cuenta que la prueba más convincente de que estaba en lo cierto no tardaría en llegar. Una de las grandes figuras de la física fue la que aportó

ideas que apoyaban la visión atomista y que difícilmente podían soslayarse. Los que, como Mach, sostenían una visión continua del mundo, iban a tener muy complicada la tarea de explicar los trabajos que Einstein y otros desarrollaron sobre el movimiento browniano.

EL POLEN JUEGA AL PING-PONG

Aunque los microscopios convencionales no permitan ver átomos individuales, sí que posibilitaron a los científicos del siglo XIX el ver el efecto que estos átomos producían en su entorno. Este efecto se llama movimiento browniano en honor de Robert Brown, que en 1827 observó el comportamiento errático de las pequeñas partículas de polen que flotan en la superficie del agua. Dado que el polen es orgánico, Brown pensó al principio que lo que hacían era mostrar signos de vida al saltar sobre el agua. El científico neerlandés Jan Ingenhousz había advertido en 1785 un comportamiento errático parecido de las partículas de polvo de carbón cuando flotan sobre alcohol. Cuando Brown vio que había materia inorgánica que imitaba el comportamiento del polen, se quedó desconcertado al no poder explicar de dónde procedía ese movimiento espasmódico.

Resulta llamativo que la idea de que la causa podrían ser átomos invisibles que chocan entre sí y cuyos movimientos trascienden a la materia visible había sido ya sugerida por el poeta romano Lucrecio en su poema didáctico *De la naturaleza*:

Muchos de los que vagan por el vacío infinito no fueron admitidos en las combinaciones de las cosas o, aun siéndolo, no pudieron conjugar sus movimientos. De este hecho tenemos un modelo e imagen constantemente ante nuestros ojos: observa, en efecto, lo que sucede cada vez que los rayos del sol, introduciéndose en la penumbra de una estancia, esparcen en ella la luz: en el mismo haz de rayos

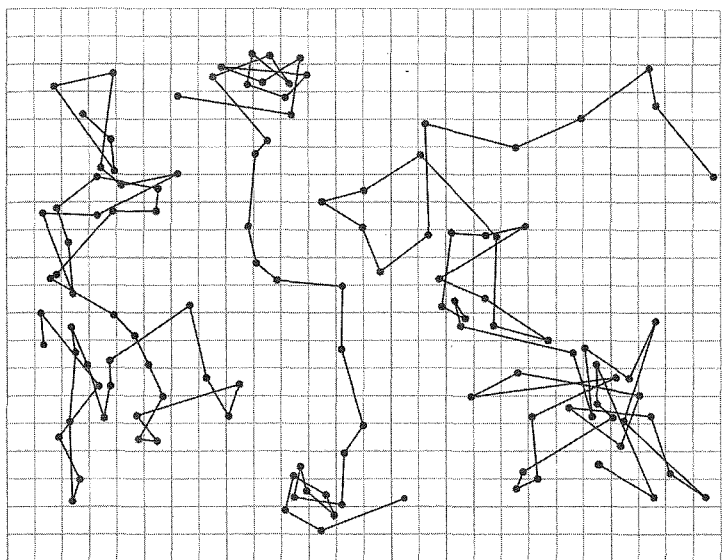
luminosos verás mezclarse de mil modos una multitud de corpúsculos [...] sus torbellinos nos revelan que también en el fondo de la materia hay movimientos secretos e invisibles [...] los elementos de las cosas se mueven por sí mismos; después, los cuerpos formados por pequeñas combinaciones y aquellos cuya energía más se aproxima a la de los átomos, impulsados por los invisibles choques de éstos, se ponen en movimiento y a su vez hostigan a los que son mayores. Así, partiendo de los átomos, el movimiento va ascendiendo y emerge poco a poco hacia nuestros sentidos, hasta hacer mover también estos cuerpos que nos son perceptibles en el rayo de sol, a pesar de no ser manifiesto el golpe que produce la moción.

La obra fue escrita en el año 60 a. C., pero hubo que esperar a que llegara el análisis matemático del movimiento que realizó Einstein para confirmar la explicación atomista del movimiento aleatorio de los rayos solares de Lucrecio y del polen de Brown.

La cuestión es proporcionar un modelo que produzca el extraño movimiento que exhiben las corpúsculos de polen sobre la superficie del agua. Si parcelamos la superficie mediante una cuadrícula, es plausible que el polen se mueva con la misma probabilidad hacia la derecha o hacia la izquierda, hacia arriba o hacia abajo. Es parecido al movimiento de un borracho que da pasos al azar siguiendo las tiradas de un dado de cuatro caras. La ilustración de la página siguiente muestra las trayectorias seguidas por varias partículas de polen tal y como las registró el físico francés Jean Perrin, que asumió el reto de explicar el movimiento del polen en su libro *Les atomes*.

A principios del siglo XX surgió la propuesta de que lo que los científicos estaban observando era cómo el polen resultaba zarandeado por el movimiento de las moléculas del agua, mucho más pequeñas.

La brillantez matemática de Einstein le abrió el camino para analizar este modelo, en el que un objeto grande está sujeto al impacto de objetos mucho más pequeños que se mueven



al azar. Probó que el modelo predecía precisamente el comportamiento observado. Imaginemos una pista de hielo con un gran disco en el centro, en la que introducimos una buena cantidad de minúsculos discos que lanzamos en direcciones aleatorias a velocidades determinadas. Una y otra vez los discos pequeños golpearán al disco grande y lo desplazarán en determinada dirección. La pericia estaba en calcular cuántos discos pequeños se necesitarían, y de qué tamaño relativo, para producir el comportamiento observado del disco grande.

El éxito de Einstein al construir este modelo matemático que reproducía el movimiento del polen fue un golpe demolidor para todos aquellos que creían que un líquido como el agua era una sustancia continua. Para alguien que siguiera creyendo en la visión de la materia de Aristóteles, resultaba sumamente difícil proponer una explicación igualmente convincente.

Los cálculos permitían estimar el tamaño de las moléculas de agua en relación al tamaño de las partículas de polen a

las que estaban vapuleando. Así se tenía una prueba convincente de que la materia venía dada en piezas discretas, aunque no se resolvía la cuestión de si se podía o no fraccionar estas piezas en otras todavía más pequeñas.

En realidad, resultó que los átomos indivisibles no eran nada indivisibles, como se vio cuando se descubrieron constituyentes más pequeños en los átomos de carbono u oxígeno. El siguiente escalón hacia lo pequeño reveló que un átomo está formado por discos todavía más diminutos que se llaman electrones, protones y neutrones. Los electrones habían salido ya a la luz unos ocho años antes del descubrimiento teórico de Einstein.

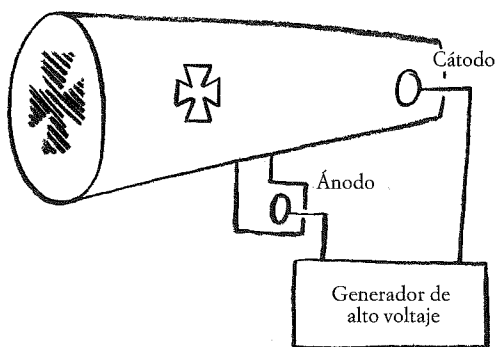
ESCRUTANDO DE CERCA EL ÁTOMO

La ciencia funciona así: uno puede aferrarse a un modelo de universo mientras no surja algo que no encaja, algo nuevo que al parecer no puede explicarse con el modelo imperante. La convicción de que el átomo podría estar formado por piezas más pequeñas surgió de experimentos que revelaban la existencia de entes que se comportaban como partículas pero que eran más diminutos que los átomos que formaban la tabla periódica.

Estos minúsculos objetos que se comportaban como partículas hicieron su aparición en los experimentos que realizó el físico inglés J. J. Thomson a finales del siglo XIX para comprender la electricidad. Había estado investigando cómo conduce la electricidad un gas. En los primeros experimentos tomó un tubo de vidrio con un electrodo en cada extremo y al aplicar un alto voltaje entre los dos electrodos produjo una corriente eléctrica entre ellos. Lo extraño es que parecía verse realmente fluir la corriente, ya que se veía un arco de luz entre los dos electrodos.

La cosa se volvió más rara todavía cuando extrajo el gas por completo del tubo y aplicó el voltaje a través del vacío. El

arco de luz desapareció. Pero, curiosamente, el cristal de uno de los extremos del tubo parecía que se volvía fluorescente. Si se colocaba una cruz de metal en el interior del tubo, aparecía una sombra en forma de cruz en medio de la zona que brillaba con la fluorescencia.



Los electrones emitidos por el cátodo que llegan a la tapa opuesta producen la fluorescencia del cristal.

La sombra siempre aparecía enfrente del electrodo negativo, también conocido como cátodo. La mejor explicación era que el cátodo estaba emitiendo algún tipo de rayo que interactuaba con la materia y la hacía brillar, ya fuera el gas que había dentro del tubo o bien el cristal mismo del tubo.

Estos «rayos catódicos» eran un misterio. Se descubrió que atravesaban finas hojas de oro cuando se interponían en su camino. ¿Consistían en algún tipo de fenómeno ondulatorio parecido a la luz? Otros pensaron que estaban hechos de partículas con carga negativa expelidas por el electrodo negativo y atraídas por el electrodo positivo. Pero ¿cómo podían estas partículas atravesar el oro sólido?

Thomson pensó que si eran partículas con carga negativa podría desviar su trayectoria a lo largo del tubo aplicando un campo magnético. El físico alemán Heinrich Hertz ya lo había intentado sin éxito, pero no había extraído una can-

tividad suficiente de gas, que alteraba el experimento. Con todo el gas extraído, las cosas funcionaban como había previsto Thomson. Al aplicar un campo magnético a los rayos, la sombra ciertamente se desplazaba. El imán curvaba los rayos.

La auténtica sorpresa vino cuando Thomson hizo unos cálculos matemáticos para determinar cuál debería de ser la masa de estas partículas cargadas. Según las leyes del movimiento de Newton, al aplicar una fuerza a una masa, la desviación producida en su trayectoria dependerá de la masa. Así que el grado de desviación que causaba el campo magnético lleva implícita información sobre la masa de esa supuesta partícula.

El cálculo depende también de la carga de la partícula, y una vez que estuvo ésta calculada en otro experimento independiente, Thomson pudo pasar a determinar la masa. La respuesta fue desconcertante. Era casi 2.000 veces más pequeña que la masa de un átomo de hidrógeno, el más pequeño de la tabla periódica.

El hecho de que estas partículas parecieran provenir del metal del electrodo condujo a la sospecha de que eran componentes del átomo. A la postre, el átomo resultaba no ser tan indivisible. Contenía porciones más pequeñas. Fueron bautizadas como electrones, nombre que provenía de la palabra griega que denota el ámbar, la primera sustancia conocida que se electrificaba.

El descubrimiento de que los átomos estaban formados por componentes todavía más pequeños supuso un trauma en la visión del mundo de muchos científicos. Tiempo después de ofrecer una conferencia sobre sus descubrimientos, Thomson confesó: «Mucho después, un físico distinguido que había asistido a mi conferencia me dijo que entonces pensó que les había estado tomando el pelo».

Thomson ensayó con un metal diferente y las masas de las partículas que emitía el metal seguían siendo las mismas. Parecía como si todos los átomos tuvieran estas partículas como componentes. Lo primero que se pensó es que, dado que un átomo de hidrógeno era 2.000 veces más pesado que este nuevo electrón, podía estar compuesto de hecho por 2.000 de estos electrones, o de una cantidad parecida. Pero un átomo de helio pesaba más o menos el doble que un átomo de hidrógeno. ¿Por qué iba a saltar el número de electrones de 2.000 a 4.000 sin más opciones intermedias? Esa relación dada por fracciones con números enteros simples entre las masas de los átomos de la tabla periódica había sido una de las razones para suponer que eran realmente atómicos. ¿Cuál era entonces la explicación de estos saltos discretos en la masa? Además, los átomos eran eléctricamente neutros. ¿Había entonces otras partículas que anulaban la carga del electrón? ¿Se podría conseguir que los átomos emitieran partículas positivas para contrarrestar los electrones negativos?

En los experimentos, realmente había pruebas de que existía un rayo positivo de partículas que fluía en dirección contraria. Cuando se aplicaba un campo magnético, era mucho más difícil curvarlo, lo cual implicaba que estas partículas eran mucho más pesadas que los electrones. El detalle curioso era esta vez que las masas de dichas partículas parecían variar según el gas que se usara para llenar los tubos. Para el hidrógeno, la masa era esencialmente la del átomo del que se partía. Parecía que los átomos de hidrógeno del tubo perdían los electrones y lo que quedaba resultaba ser una partícula grande positiva que era entonces atraída por el electrodo opuesto.

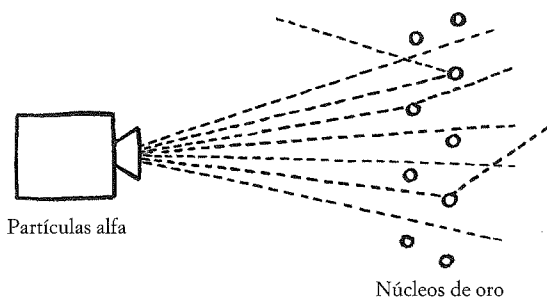
Thomson consiguió un efecto parecido con otros gases: helio, nitrógeno, oxígeno. Las masas eran siempre múltiplos enteros de la partícula positiva producida por el átomo de

hidrógeno. Una vez más, la armonía atómica. Por el momento, no había ningún motivo para pensar que no existieran muchos tipos de partículas positivas distintas, igual que existían muchos tipos de átomo. Thomson había propuesto un modelo atómico conocido como el pudin de pasas. La parte con carga positiva del átomo, que era más pesada que el electrón, cargado negativamente, formaba el pudin que constituía el grueso del átomo, mientras que los electrones eran las frutillas que había dentro.

Entonces comenzó la era del bombardeo del átomo, que condujo finalmente al pulverizador atómico definitivo: el Gran Colisionador de Hadrones del CERN. El físico británico Ernest Rutherford, nacido en Nueva Zelanda, es universalmente reconocido como el descubridor del protón, la partícula que hacía el papel de constituyente básico de todas esas partículas positivas que Thomson había investigado.

Rutherford se entusiasmó por la radiactividad, un fenómeno descubierto hacía poco tiempo. Los átomos de uranio parecía que expelían partículas que podían ser detectadas mediante placas fotográficas. Al parecer había dos tipos de radiación, que se acabaron llamando partículas alfa y partículas beta. Las partículas alfa eran más fáciles de detectar. Rutherford descubrió que, usando un campo magnético, podía curvar la trayectoria de estos rayos alfa, igual que Thomson había curvado la trayectoria de las partículas negativas. Los cálculos mostraron que tenían la misma masa que los átomos de helio despojados de sus electrones. La corazonada de que los rayos alfa emitidos por el uranio eran realmente porciones del átomo de helio quedó confirmada cuando se combinaron los rayos alfa con una lluvia de electrones, lo que dio lugar a que se formara un gas estable. El análisis químico pronto confirmó que el gas era ciertamente helio.

Entonces un estudiante de Rutherford, Hans Geiger, colocó una fina lámina de oro entre una corriente de partículas alfa y una placa que detectaba las partículas, y aparecieron de nuevo pruebas que contradecían el modelo teórico del átomo. En el modelo del átomo que considera que éste tiene la carga positiva distribuida equitativamente, como en un pudín, las partículas alfa positivas que atraviesan el metal serían repelidas por las cargas positivas del átomo. Pero, dado que la carga está repartida a lo largo y ancho del átomo, lo esperable sería que no se produjera mucha desviación en la trayectoria de los rayos alfa.



Partículas alfa desviadas por los núcleos de los átomos de oro.

Geiger descubrió que, por el contrario, algunas de las partículas alfa sufrían un violento desvío en su trayectoria, hasta el extremo de que algunas rebotaban sobre la lámina de oro y volvían en dirección contraria. Rutherford se quedó perplejo: «Era como disparar un proyectil de 15 pulgadas contra una pantalla de papel de seda y comprobar que rebota y viene hacia ti».

Otra vez, un cálculo matemático fue el que dio lugar a un nuevo modelo. Contando cuántas partículas alfa resultaban desviadas y hasta qué punto, descubrieron que los datos eran compatibles con la hipótesis de que la carga y la masa

se encontraban concentradas en un espacio diminuto en el centro del átomo, que recibió el nombre de núcleo. Todavía no estaba claro si este núcleo era indivisible o no.

Cuando Rutherford bombardeó átomos más ligeros con partículas alfa, resultó evidente que el núcleo no era una entidad unitaria, sino que estaba compuesto por otras partículas. Rastreando las trayectorias de las partículas alfa en una cámara de niebla, detectó algunas que eran cuatro veces más largas de lo que deberían. Era como si el núcleo emitiera otra partícula cuatro veces más ligera al sufrir el impacto de las partículas alfa. Gases diferentes producían el mismo resultado. En realidad, Rutherford comprobó que el nitrógeno puro se convertía en oxígeno como efecto del impacto. Al eliminar una de esas partículas, el elemento cambiaba.

Ahí estaba la prueba de la existencia de un bloque constituyente que formaba parte del núcleo de todos los átomos. Se comportaba exactamente igual que un átomo de hidrógeno desprovisto de su electrón. Rutherford había descubierto el protón. Los núcleos de los átomos se formaban tomando múltiplos enteros del protón. El único problema era que la carga del átomo no tenía sentido. El helio poseía un núcleo que era cuatro veces más pesado que el átomo de hidrógeno, y sin embargo su carga era solamente el doble. Quizá había electrones en el núcleo, acompañando a los protones, y compensando así sus cargas. Pero la física desarrollada para explicar el comportamiento de estas partículas excluía el hecho de que electrones y protones pudieran vivir en tan estrecha vecindad, de modo que ésta no podía ser la explicación.

Esto llevó a Rutherford a conjeturar, en la década de 1920, que podía existir un tercer componente, al que llamó neutrón, con más o menos la misma masa que el protón pero sin carga. Encontrar pruebas de la existencia de esta partícula resultó ser un problema muy intrincado. Solía discutir con su colega James Chadwick métodos disparatados para revelar la presencia del neutrón. Algunos experimentos llevados

a cabo en la década de 1930 en Alemania y en Francia detectaron finalmente que diversos núcleos, cuando eran bombardeados con partículas alfa, emitían partículas que parecían no tener carga. Pero los científicos que realizaron los experimentos pensaron, erróneamente, que se trataba de algún tipo de radiación electromagnética, como los rayos gamma de alta frecuencia que había descubierto a principios de siglo el físico francés Paul Villard.

No obstante, Chadwick estaba convencido de que estas partículas tenían que ser los neutrones, los protagonistas de sus frecuentes discusiones con Rutherford. Nuevos experimentos revelaron que su masa era ligeramente superior a la del protón, y al no tener carga, esta nueva partícula era el componente que faltaba para cuadrar correctamente las cuentas. Con el descubrimiento de Chadwick, parecía que se habían revelado por fin los constituyentes básicos de la materia.

Era un modelo muy atractivo. Fuego, tierra, aire y agua, los cuatro elementos de Aristóteles habían sido reducidos a tres partículas: el electrón, el protón y el neutrón. Los científicos pensaron que con estos tres constituyentes básicos podían construir toda la materia. El oxígeno: 8 protones, 8 neutrones y 8 electrones. El sodio: 11 protones, 12 neutrones y 11 electrones. Era como si sonara la música de las esferas y los fundamentos de la materia fueran estas tres notas: protones, neutrones y electrones. Toda la materia parecía estar hecha de combinaciones de números enteros de estas tres partículas. ¿Quién iba a pensar que estas partículas podrían estar formadas por entidades más pequeñas? Si fuera así, cabría esperar la aparición de piezas fraccionales entre los elementos de la tabla periódica.

Sin embargo, la subdivisión no terminaba aquí. Matemática y también experimentalmente, resultó que había motivos muy sólidos para pensar que los protones y los neutrones no eran indivisibles. Pero los constituyentes básicos de los protones y los neutrones poseían una extraña propiedad:

no gustaban de presentarse solos. Solamente aparecían en grupos, formando lo que llamamos un protón o un neutrón. Camuflados en la masa. Pero, si nunca han sido vistos aisladamente, ¿por qué los científicos piensan que existen estas porciones más pequeñas de materia que juntas forman los protones y los neutrones?

Todo lo que llamamos real está hecho de cosas que no podemos considerar reales.

NIELS BOHR

A finales de la década de 1920, parecía que ya habían sido localizadas las piezas constitutivas básicas de la materia. Todos los átomos de la tabla periódica podían construirse combinando electrones, protones y neutrones. El electrón se había resistido a todos los intentos de descomponerlo aún más. Pero algunos descubrimientos de las décadas siguientes hicieron creer a los científicos que existía otro peldaño de la realidad oculto tras los otros dos constituyentes básicos.

La razón principal para llegar al convencimiento de que los protones y los neutrones no podían ser tan indivisibles como el electrón no nació de una tecnología más sofisticada, sino de las matemáticas de la simetría. Sorprende que una y otra vez sean las matemáticas el mejor microscopio que tenemos para ver lo que pasa en el interior de mi dado. Comenzó a surgir un modelo matemático que explicaba el protón y el neutrón, y a partir de un concepto matemático se dedujo que podían ser subdivididos. Si las matemáticas podían descomponerse en piezas más pequeñas, la sensación era que lo mismo debería ocurrir con el protón y el neutrón.

El modelo matemático responsable de esta creencia en la divisibilidad del protón y del neutrón apareció porque los físicos descubrieron que había muchas más partículas que las tres que se creía que constituían los átomos estables.

El descubrimiento de estas nuevas partículas fue el resultado de experimentos en colisionadores. No en los colisionadores contruidos por el ser humano, como el LHC, sino

en los colisionadores naturales en que se convierten las capas superiores de la atmósfera cuando son bombardeadas por los rayos cósmicos.

UNA BUENA COLECCIÓN DE PARTÍCULAS

La primera prueba de las nuevas partículas se descubrió en las cámaras de niebla que los experimentadores habían construido en sus laboratorios para registrar las trayectorias que seguían las partículas cargadas. Las cámaras de niebla consisten en un tanque sellado lleno de vapor de agua y alcohol sobresaturado. La sobresaturación es tan intensa que cualquier partícula cargada que atraviesa el vapor deja un rastro de condensación a su paso.

Carl Anderson, un físico que trabajaba en Caltech, había usado estas cámaras de niebla en 1933 para confirmar la existencia de un nuevo tipo de materia bastante extraño, llamada antimateria, que había sido conjeturado algunos años antes por el físico británico Paul Dirac. El intento de Dirac de unificar la física cuántica y la teoría electromagnética había explicado con éxito muchas cosas de los electrones, pero las ecuaciones parecían tener otra solución completa mediante simetría especular, que no se correspondía con nada que se hubiera visto antes en un laboratorio.

La ecuación de Dirac era algo parecido a la ecuación $x^2 = 4$. Está la solución $x = 2$, pero hay otra solución especular, que es $x = -2$, porque -2×-2 es también igual a 4. La solución especular de las ecuaciones de Dirac implicaba que había una solución especular del electrón, con carga positiva. Muchos pensaron que se trataba solamente de una curiosidad matemática que provenía de las ecuaciones, pero cuando, cuatro años más tarde, Anderson detectó en su cámara de niebla trayectorias de una partícula que se comportaba como un electrón al otro lado del espejo, la antimateria pasó de la teoría a la realidad. Los positrones de Anderson, como fueron lla-

mados, habían sido creados en las interacciones entre partículas que acaecen en la atmósfera superior. Y no eran lo único nuevo que iba a aparecer.

Pronto otras partículas todavía más extrañas, que nadie había pronosticado, dejaban pistas en la cámara de niebla de Anderson. Éste empezó a analizar las nuevas partículas con ayuda de su estudiante de doctorado Seth Neddermeyer en 1936. Las nuevas partículas correspondían a partículas con carga negativa que atravesaban la cámara de niebla. Pero no eran electrones. Las trayectorias trazadas por estas nuevas partículas indicaban que poseían una masa mucho más grande que la del electrón. Como había probado Thomson, la masa puede medirse detectando cuánto se desvía la partícula bajo la influencia de un campo magnético. La partícula parecía tener la misma carga que el electrón, pero era mucho más difícil desviar su trayectoria.

Ahora se llama muón y fue una de las primeras partículas que se descubrieron en las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera. El muón es inestable. Se desintegra rápidamente en otras partículas, casi siempre en un electrón y un par de neutrinos. Los neutrinos eran otras nuevas partículas que habían sido vaticinadas para explicar cómo los neutrones se desintegran produciendo protones. Sin apenas masa y carentes de carga, hubo que esperar hasta la década de 1950 para que se detectaran, pero teóricamente explicaban la desintegración del neutrón y también la del nuevo muón. La velocidad media de desintegración del muón era aproximadamente 2,2 microsegundos, que resulta ser tiempo suficiente para que algunas partículas alcancen la superficie terrestre antes de desintegrarse.

El muón ayudó a confirmar la predicción de la relatividad especial de Einstein, que afirma que el tiempo se ralentiza cuando nos acercamos a la velocidad de la luz. Dado su período de semidesintegración, deberían llegar a la superficie terrestre muchos menos muones de los que efectivamente

se detectaban. El hecho de que el tiempo discurre más lentamente a velocidades cercanas a la de la luz ayuda a explicar esta discrepancia. Si se pudiera colocar un reloj al muón, éste mostraría que ha tardado un intervalo de tiempo más corto en llegar a la Tierra. Así que tendrían que sobrevivir más muones, como se comprobó experimentalmente. Volveremos sobre esto en la quinta «frontera», en la que trataremos de arrastrar al tiempo hasta los límites del conocimiento.

El muón se comportaba aparentemente de modo muy parecido al electrón, pero tenía más masa y era más inestable que éste. Cuando el físico estadounidense Isidor Rabi se enteró del descubrimiento, exclamó: «Pero ¿quién ha pedido esto?». Parecía muy raro, por innecesario, que la naturaleza se hubiera ocupado de reproducir una versión más pesada y más inestable del electrón. Poco sospechaba entonces Rabi la cantidad de cosas que le depararía el menú de las partículas.

Al percatarse de que las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera superior estaban creando nuevas formas de materia, los físicos decidieron no esperar a que las partículas llegaran hasta las cámaras de niebla, ya que era probable que para entonces se hubieran desintegrado en formas tradicionales de materia. Así que trasladaron las cámaras de niebla a la alta montaña con la esperanza de localizar así otras partículas.

El equipo de Caltech escogió la cumbre del monte Wilson, cerca del campus de Pasadena. Como estaba previsto, aparecieron nuevos rastros que indicaban que estaban recogiendo pistas de nuevas partículas. Otros equipos colocaron placas fotográficas en los Pirineos y en los Andes para ver si podían registrar interacciones diferentes. Equipos de Bristol y de Mánchester también vieron indicios de nuevas partículas en sus propias placas fotográficas. Resultó que el muón había de ser una de las preocupaciones menores de Rabi. Empezó a salir a la luz toda una colección de nuevas partículas.

Algunas tenían aproximadamente una octava parte de la

masa de un protón o de un neutrón. Aparecían en versiones con carga positiva o negativa y recibieron el nombre de piones. Más tarde se descubrió una versión sin carga eléctrica, que era más difícil de detectar. En Mánchester, dos fotografías de la cámara de niebla mostraban lo que parecía ser una partícula neutra que se desintegraba en piones. La masa de estas nuevas partículas era más o menos la mitad de la del protón. La cámara de niebla de la cumbre del monte Wilson registró más pruebas de lo que acabaría conociéndose como kaones, de los que hay cuatro tipos.

Con el paso del tiempo, se fueron descubriendo cada vez más partículas, hasta el punto de que la cosa empezó a resultar sumamente engorrosa. Como se le ocurrió decir al premio Nobel Willis Lamb en su discurso de aceptación de 1955: «Al descubridor de una nueva partícula elemental se le solía conceder el Premio Nobel, pero lo que habría que hacer ahora es penarle con una multa de diez mil dólares». Quedaba la esperanza de que la tabla periódica pudiera simplificarse una vez que los científicos descubrieran cómo estaba ensamblada a base de electrones, neutrones y protones. Pero resultó que estas tres partículas eran solamente la punta del iceberg. Ahora había más de un centenar de partículas que parecían integrar los constituyentes básicos de la materia. Como por entonces reconoció Enrico Fermi a un estudiante: «Joven, si fuera capaz de acordarme del nombre de todas esas partículas, me hubiera hecho botánico».

Igual que Mendeléyev consiguió descubrir algunos criterios de ordenación con los que clasificar y dar sentido a los átomos de la tabla periódica, ahora se trataba de encontrar un principio unificador que pudiera explicar los nuevos muones, piones, kaones y demás partículas.

La estructura subyacente que pareció finalmente dar sentido a toda esta batería de partículas—el plano, por así decirlo, para no perderse en el zoológico—se redujo a la postre a un concepto matemático.

EL PLANO DEL ZOOLOGICO DE LAS PARTÍCULAS

Cuando uno trata de clasificar algo, es de gran ayuda reconocer las características dominantes que puedan servir para subdividir un conjunto grande y confuso de objetos en grupos más pequeños. En el caso de los animales, la idea de especie establece algo de orden en el reino animal. En la física de partículas, la idea de carga fue un invariante importante que ayudó a repartir el zoo en grupos más pequeños. ¿Cómo interactúa la partícula con la fuerza electromagnética? Los electrones se desvían hacia un lado, los protones hacia el otro y los neutrones se quedan igual.

Según iban surgiendo de la maleza estas nuevas partículas, se las podía hacer pasar por la puerta de la fuerza electromagnética. Algunas irían a parar a la cesta del electrón, otras se encaminarían hacia el protón y las demás irían a juntarse con el neutrón. Éste era un primer paso conducente a imponer un poco de orden en la colección de partículas.

Pero la fuerza electromagnética, como está comprobado, es una de las fuerzas fundamentales que contribuyen a conservar el universo aglutinado. Las otras son la gravedad, la fuerza nuclear fuerte, que es la responsable de mantener juntos, bien apretados en el núcleo, a protones y neutrones, y finalmente la fuerza nuclear débil, que es la que controla cosas como la desintegración radioactiva.

La clave era identificar otras características parecidas a la idea de carga que pudieran distinguir los diferentes comportamientos de estas partículas bajo la influencia de las otras fuerzas fundamentales. Por ejemplo, la masa de una partícula era de hecho un criterio muy bueno para establecer una jerarquía en el zoo de las partículas. Colocaba juntos a los piones y los kaones como partículas que eran más ligeras en un factor, comparadas con los protones y neutrones que constituyen la materia corriente. Una colección nueva de partículas llamadas bariones sigma, xi y lambda tenían masas más

grandes que el protón y el neutrón, y solían desintegrarse en protones y neutrones.

Las partículas con masas muy parecidas solían recibir los mismos nombres griegos. De hecho, el protón y el neutrón tienen masas tan parecidas que se pensaba que estaban estrechamente relacionados, hasta el punto de que el físico alemán Werner Heisenberg (cuyas ideas serán centrales en la próxima «frontera») las rebautizó como nucleones. Pero la masa era un método bastante básico y austero de clasificar estas partículas. Los físicos iban en busca de algo más fundamental: un patrón tan efectivo como el que había descubierto Mendeléyev para ordenar los átomos.

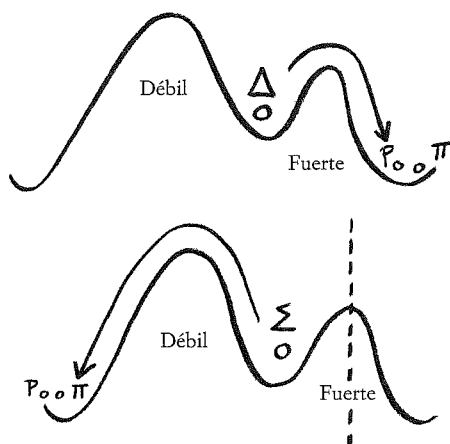
La clave para encontrar patrones que dieran sentido al asalto de nuevas partículas fue una nueva propiedad que se llamó extrañeza. Este nombre surgió del comportamiento, bastante extraño, exhibido por algunas de estas partículas cuando se desintegran. Dado que la masa es equivalente a la energía, según la ecuación de Einstein $E = mc^2$, y que la naturaleza favorece los estados de baja energía, las partículas con mayor masa tratan normalmente de desintegrarse en partículas con una masa menor.

Hay varios mecanismos que regulan esta desintegración, cada uno de los cuales depende de una de las fuerzas fundamentales y posee alguna característica especial que ayuda a los físicos a entender cuál de las fuerzas fundamentales produce la desintegración. Aquí, de nuevo, son consideraciones sobre la energía las que controlan cuál de las fuerzas es más probable que esté detrás de la desintegración. La fuerza nuclear fuerte es normalmente la primera que aparece a la hora de desintegrar una partícula, y en general tarda en desintegrarla 10^{-24} segundos. La siguiente en la jerarquía es la fuerza electromagnética, de cuya actuación se puede derivar la producción de fotones. La fuerza nuclear débil es la más costosa en términos de energía y por eso actúa más lentamente. Una partícula puede tardar 10^{-11} segundos en desintegrarse bajo la acción de

la fuerza nuclear débil. Así, observando cuánto tiempo tarda una partícula en desintegrarse, los científicos pueden conseguir indicaciones de qué fuerza es la que actúa en cada caso.

Por ejemplo, un barión delta se desintegra en 6×10^{-24} segundos, produciendo un protón y un pión bajo la influencia de la fuerza nuclear fuerte, mientras que un barión sigma tarda 8×10^{-11} segundos en desintegrarse también en un protón y un pión. Este lapso de tiempo más largo a la hora de desintegrarse significa que el proceso está controlado por la fuerza nuclear débil. A medio camino tenemos el ejemplo de un pión sin carga eléctrica, que se desintegra en $8,4 \times 10^{-17}$ segundos en dos fotones bajo la acción de la fuerza electromagnética.

Imaginemos una pelota situada en un valle. A la derecha hay un camino que conduce a la pelota, tras un pequeño impulso, a un valle inferior, después de superar la colina. Éste es el camino correspondiente a la fuerza nuclear fuerte. A la izquierda hay una colina más alta, con un camino que lleva a un estado de energía más baja. Esta dirección representa la acción de la fuerza nuclear débil.



Un barión delta (Δ) se desintegra bajo la acción de la fuerza nuclear fuerte en un protón y un pión. Por el contrario, un barión sigma (Σ) se desintegra bajo la acción de la fuerza nuclear débil.

Pero, entonces, ¿por qué el barión delta opta por el camino de la colina fácil y el barión sigma elige el camino difícil? Esto parecía muy raro. Parecía que había algunas partículas que topaban con una barrera (representada en la figura con una línea discontinua) que les impedía cruzar al valle inferior por la ruta fácil.

NO HAY BELLEZA EXQUISITA SIN ALGUNA RAREZA

Los físicos Abraham Pais, Murray Gell-Mann y Kazuhiko Nishijima idearon una estrategia ingeniosa para resolver este enigma. Plantearon una nueva propiedad, análoga a la carga eléctrica, que arbitraba cómo interactuaban estas partículas con la fuerza nuclear fuerte. Esta nueva propiedad, llamada extrañeza, proporcionó a los físicos un nuevo modo de clasificar todas estas partículas. A cada nueva partícula se le asignaba una medida de extrañeza que reflejaba su tendencia a optar por el camino largo a la hora de desintegrarse.

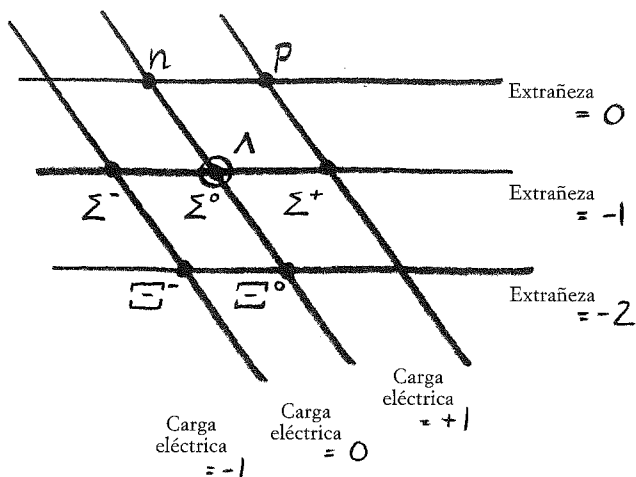
La idea es que la fuerza nuclear fuerte no puede cambiar la extrañeza de una partícula, de modo que si tenemos dos partículas con distinta extrañeza, la fuerza nuclear fuerte no puede hacer que la una se desintegre para dar paso a la otra. Hay una barrera que bloquea la ruta que conduce al valle inferior. Pero la fuerza nuclear débil puede alterar la extrañeza. Como la fuerza nuclear fuerte desintegra un barión delta en un protón, a los dos se les asigna un valor de extrañeza igual a 0; pero el barión sigma tiene un valor diferente de extrañeza, ya que precisa de la fuerza nuclear débil para desintegrarse en un protón: se le asigna una extrañeza de valor -1 . (El que estas partículas recibieran el valor de extrañeza -1 fue fruto de una casualidad; en realidad, nada habría cambiado si se les hubiera asignado a éstas el valor 1 y el valor -1 a las antipartículas).

Tiempo después empezaron a aparecer partículas más exó-

ticas, creadas mediante colisiones de alta energía, que parecían desintegrarse en dos pasos. Recibieron el nombre de partículas cascada. Lo que se propuso es que estas partículas eran doblemente extrañas, por lo que se les asignó un número de extrañeza igual a -2 . El primer paso de la desintegración tenía extrañeza -1 y después terminaban convertidas en protones y neutrones, que tenían extrañeza 0 . Esto puede parecer un poco como sacarse un conejo de la chistera, pero forma parte del proceso del que surge la ciencia. Hay que seguir sacando cosas de la chistera. Muchas hay que descartarlas, ya que no conducen a ninguna parte, pero si uno persevera, alguna que otra vez sale un conejo. Como reconoció Gell-Mann: «La teoría de la extrañeza se me ocurrió cuando estaba explicando a alguien una idea errónea, pero entonces chasqué la lengua y pensé que ya tenía la teoría de la extrañeza». La extrañeza resultó ser un conejo bastante alucinante.

Originalmente la idea de extrañeza se consideró simplemente como un instrumento de contabilidad, algo que seguía la pista cumplidamente a los patrones de desintegración entre partículas. No se pretendía asignar ningún significado físico a la idea de extrañeza. Era solamente otra colección más de jaulas que ayudaba a clasificar a los animales del zoológico de las partículas. Sin embargo, lo que ocurrió fue que esta nueva característica resultó ser de hecho el primer atisbo de una realidad física mucho más profunda que está presente en el comportamiento de todas estas partículas. Lo más emocionante llegó cuando se tomaron las partículas con un tipo parecido de masa y se empezaron a colocar en un grafo que medía a la vez su extrañeza y su carga eléctrica. Lo que se obtuvo así fueron diagramas llenos de simetría.

El patrón de partículas creaba un retículo hexagonal con dos partículas situadas en el punto central de la red. Si se tomaban los piones y los kaones y se colocaban sobre un retículo que enfrentaba la extrañeza y la carga, salía un diagrama



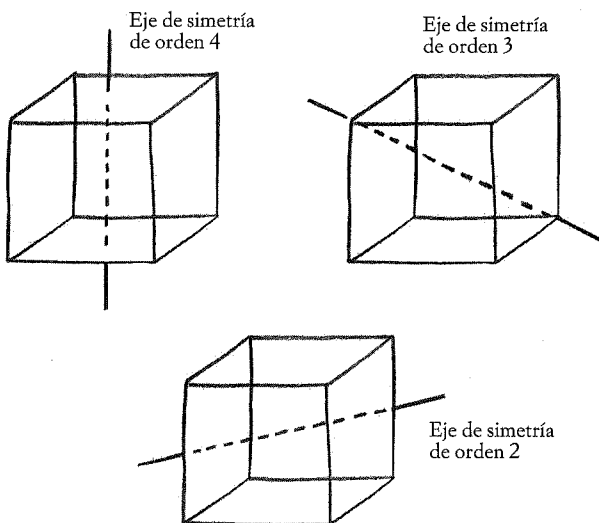
muy parecido. Cuando aparece un patrón así, uno sabe que hay algo detrás. La clave para descubrir la realidad profunda que había tras estas partículas fue observar que los patrones hexagonales que mostraban las gráficas no eran nuevos: ya se habían visto antes. Pero no en la física, sino en las matemáticas de la simetría.

ILUMINACIÓN SIMÉTRICA

Para alguien con experiencia en las matemáticas de la simetría, estas disposiciones de jaulas que siguen un patrón hexagonal con un punto doble en el centro resultan muy familiares. Son el rasgo distintivo de un objeto simétrico muy singular que recibe el nombre de $SU(3)$.

Para mí esto es fantástico. De simetría sí que sé algo. Esto me da la oportunidad de conocer lo que pasa en las profundidades de mi dado. De hecho, el dado es un vehículo perfecto para explicar las ideas que están en la base de las matemáticas de la simetría. Las simetrías del cubo (sin tener en cuenta los puntos que aparecen en sus caras) son todas las maneras en las que puedo tomar el dado, hacerlo girar en el

aire y volverlo a posar en su sitio como estaba antes de moverlo. Hay de hecho 24 modos diferentes de hacer esto. Por ejemplo, podría girar simplemente el cubo un cuarto de vuelta en torno a una de las caras o un tercio de vuelta en torno al eje que pasa por dos vértices diagonalmente opuestos del cubo.



En total puedo hacer 24 movimientos diferentes (incluido uno bastante especial que consiste en dejar el cubo como está y no hacer nada). Esta colección de movimientos simétricos recibe el nombre de S_4 , o grupo simétrico de grado 4. Si incluimos la simetría especular, lo que quiere decir que podemos mirar también el dado en un espejo, hay un total de 48 simetrías diferentes del cubo.

Uno puede considerar que el cubo es la forma geométrica en dimensión tres sobre la que actúa el grupo de simetría S_4 . Pero hay otras formas geométricas cuyas simetrías son las mismas. Por ejemplo, el octaedro es otra forma geométrica tridimensional cuyo grupo de simetrías es el mismo que el

del cubo. No obstante, hay objetos de dimensión superior cuyas simetrías son también s_4 . De modo que existen multitud de geometrías diferentes que tienen el mismo grupo de simetrías subyacentes.

Detrás de las gráficas hexagonales construidas con las partículas no estaba el grupo de simetría del dado, sino un objeto simétrico que se llama $SU(3)$. La denominación $SU(3)$ denota el «grupo especial unitario de dimensión 3», pero puede describir las simetrías de todo un abanico de diferentes objetos geométricos en diferentes dimensiones. Los retículos hexagonales creados por las partículas son los mismos que los esquemas que usan los matemáticos para describir el modo en que $SU(3)$ actúa sobre cierto objeto en un espacio de dimensión ocho. Las ocho partículas del retículo hexagonal corresponden al número de dimensiones necesarias para crear este objeto simétrico.

Este diseño hexagonal fue la piedra de Rosetta que inauguró toda una nueva cultura en el trato de la física de partículas, aunque fue una analogía cultural distinta la que prevaleció a la hora de realzar este descubrimiento. El faro que suponía la figura con ocho partículas, correspondiente a esta representación en dimensión ocho, condujo a llamar al fenómeno el camino óctuple, en referencia a la idea budista del camino óctuple hacia la iluminación.

Existen otros diagramas que corresponden a objetos de diferentes dimensiones sobre los que puede actuar $SU(3)$. La revelación más fascinante fue que estos distintos diagramas podían usarse para ensamblar juntos a otros miembros de la colección de partículas. Las diversas representaciones geométricas de las simetrías de $SU(3)$ parecían ser las responsables de las diferentes partículas físicas que constituyen la materia del universo.

Me resulta chocante cómo una y otra vez el mundo físico parece convertirse en una parte de las matemáticas. Habrá que preguntarse hasta qué punto esto es solamente un buen

modo de contar las cosas que ayuda a cohesionar el universo, o si el universo físico es en realidad una pieza matemática convertida en física. Con este nuevo nexo, las partículas fundamentales pasaron a ser objetos geométricos que permanecen estables bajo la acción de este grupo de simetrías sobre el espacio geométrico.

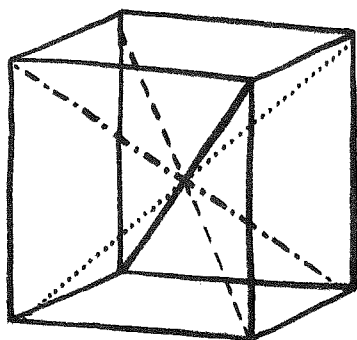
Heisenberg acertó cuando dijo: «La física moderna se ha inclinado decididamente a favor de Platón. De hecho, las unidades más pequeñas de materia no son objetos físicos en el sentido usual del término; son formas, ideas que pueden expresarse sin ambigüedad solamente en el lenguaje matemático». El acuoso icosaedro y el ardiente tetraedro han sido reemplazados por esta extraña forma simétrica nueva $SU(3)$.

Cuando el mundo físico se convierte en parte de las matemáticas, siento inmediatamente que ahora es algo que puedo comprender. Las matemáticas de la simetría son mi lenguaje. Para muchos, convertir las partículas fundamentales en matemáticas significa alejarse de las cosas que conocen. Comparar las partículas con bolas de billar u ondas las hace más tangibles. A menos que surja del modo en el que interactuamos físicamente con el mundo que nos rodea, ¿cómo podemos conocer algo? Incluso el lenguaje abstracto de los objetos simétricos de dimensión ocho es posible solamente porque hacemos abstracción de ideas de cosas que hemos conocido físicamente, como la simetría de mi dado de Las Vegas.

SIMETRÍA MULTIFACÉTICA

El punto esencial aquí es que uno puede tener varios objetos geométricos diferentes cuyo grupo de simetrías subyacente es el mismo; y a la inversa, si uno tiene un grupo de simetrías, puede haber muchos objetos físicos diferentes cuyas simetrías quedan descritas por ese grupo. Los matemáticos dicen que el objeto es una representación del grupo abstracto de

simetrías, igual que tres manzanas o tres dados son en ambos casos manifestaciones físicas del concepto abstracto número 3. Por ejemplo, con mi dado de casino se pueden hacer 24 rotaciones diferentes. Si consideramos las cuatro diagonales que unen vértices opuestos del cubo, estas rotaciones permutan estos segmentos entre sí.



De hecho, si ponemos cuatro naipes (as, rey, caballo y sota) en esos cuatro segmentos, cada rotación es como barajar estas cuatro cartas: hay 24 modos diferentes de reordenar 4 cartas. Pero se puede conseguir otra representación más de este grupo de simetrías. Si tomamos un tetraedro y consideramos las rotaciones y reflexiones del mismo, hay de nuevo 24 simetrías diferentes. Si pegamos los naipes en cada una de las cuatro caras del tetraedro, las simetrías del tetraedro producen las 24 permutaciones diferentes de las cartas. El grupo de simetrías tiene ahora dos realizaciones tridimensionales distintas como grupo de simetrías de un objeto geométrico: una como las rotaciones de un cubo, otra como las rotaciones y reflexiones de un tetraedro. Resulta que si miramos todas las representaciones geométricas en todas las dimensiones de ese objeto llamado $SU(3)$, los objetos simétricos nos proporcionan un modo de generar todas las diferentes partículas fundamentales que estaban apareciendo.

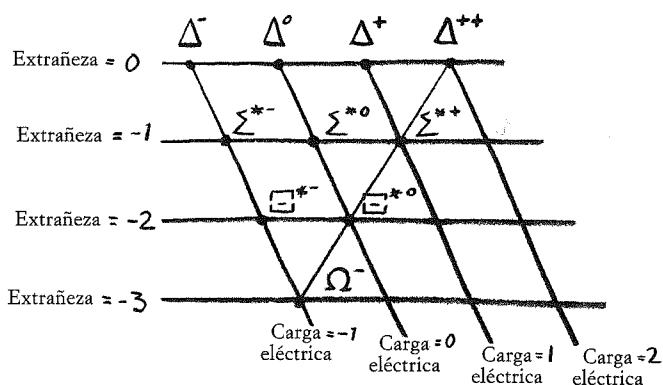
Los físicos Gell-Mann y Yuval Ne'eman fueron los que, independientemente, reconocieron los patrones de estas partículas. De hecho, Ne'eman compaginaba su carrera de física con un puesto en el IDF, el Ministerio de Defensa israelí, y había sido destinado a Londres como agregado militar. Su intención era estudiar relatividad general en el King's College, pero cuando vio que quedaba muy lejos de la embajada israelí, en Kensington, decidió comprobar qué estudios ofrecía el Imperial College, situado en la misma calle, a cinco minutos a pie de la embajada. Allí impartían física de partículas. Ne'eman pasó de interesarse por lo más grande a concentrarse en lo más pequeño.

Aunque el patrón para las partículas lambda, sigma y xi, junto con el protón y el neutrón, encajaba con la simetría en dimensión ocho de $SU(3)$, en el patrón correspondiente de kaones y piones faltaba una partícula en el centro. O el patrón era erróneo o faltaba una partícula por descubrir. Gell-Mann publicó su predicción de la partícula ausente en una prepublicación de Caltech a principios de 1961. Y como era de suponer, la partícula eta fue descubierta unos meses después por los físicos de Berkeley.

Éste era el escenario perfecto para la confirmación de una nueva teoría: si permite hacer una predicción física que es confirmada a continuación, es que va por muy buen camino. Lo mismo ocurrió de nuevo cuando Gell-Mann y Ne'eman coincidieron en un congreso en junio de 1962, en el CERN. En él se anunció el descubrimiento de toda una familia de partículas nuevas: tres bariones sigma con extrañeza -1 y dos bariones xi con extrañeza -2 . Se suponía que estas partículas corresponderían a uno de los otros diagramas que muestran cómo actúa el grupo de simetrías $SU(3)$ sobre un objeto geométrico de dimensión superior.

Mientras Gell-Mann y Ne'eman estaban allí sentados en el congreso, cada uno cavilando en cómo encajar estas nuevas partículas en sus esquemas, comenzó a surgir una nueva des-

cripción, basada en otro de los objetos simétricos sobre los que actúa $SU(3)$, esta vez en dimensión 10. Pero faltaba una de las esquinas del diagrama. Solamente había nueve partículas. Gell-Mann y Ne'eman se dieron cuenta ambos a la vez de que había un hueco vacío, lo que llevaba inevitablemente a la predicción de una nueva partícula. Gell-Mann fue el que primero levantó la mano y predijo la partícula omega con extrañeza -3 , predicción que se confirmó en enero de 1964.



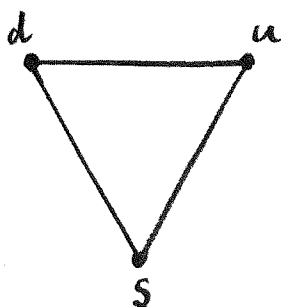
Era la versión del siglo xx de la historia de la tabla periódica de Mendeléyev: se descubría una estructura subyacente pero faltaban algunas de las piezas del rompecabezas. Igual que el descubrimiento de los átomos ausentes confirió credibilidad al modelo de Mendeléyev, el descubrimiento de estas partículas que faltaban ayudó a convencer a los científicos de que estas estructuras matemáticas eran herramientas muy útiles para desenvolverse en el zoológico de las partículas.

Lo que latía detrás de los patrones que Mendeléyev descubrió en la tabla periódica era realmente que estos átomos estaban hechos de otras partículas fundamentales: el protón, el electrón y el neutrón. Se tenía la sensación de que los patrones hallados en todas las partículas recientemente descubiertas apuntaban a una historia parecida: la existencia de

más constituyentes básicos en el interior de los cientos de partículas que se estaban detectando.

LOS QUARKS: ¿EL PELDAÑO QUE FALTABA?

Algunos físicos habían observado que si se colocan los esquemas correspondientes a las distintas representaciones multidimensionales de $SU(3)$ en peldaños, se obtiene una forma piramidal en la que falta la cúspide. Debería de haber algo análogo a un sencillo triángulo en la cima de todo esto. Correspondería a la representación física más sencilla de $SU(3)$ actuando sobre una geometría de dimensión tres. Si se examinan todos estos peldaños desde el punto de vista de la simetría, el peldaño que faltaba era realmente aquél a partir del cual se podían construir el resto de los peldaños. Pero nadie había visto nunca partículas que pudieran corresponder con este último peldaño.



El triángulo que apuntaba a la existencia de tres nuevas partículas: el quark arriba (u), el quark abajo (d) y el quark extraño (s).

Robert Serber, la mano derecha de Robert Oppenheimer durante el Proyecto Manhattan, fue uno de los que conjeturaron que quizá este peldaño extra sugería la existencia de

tres partículas fundamentales que podrían usarse para construir todas las partículas de los otros peldaños. En una comida con Gell-Mann en 1963, Serber le explicó su idea, pero cuando Gell-Mann le retó a concretar qué carga eléctrica tendrían estas partículas hipotéticas, Serber vaciló. Gell-Mann comenzó a garabatear unos cálculos en una servilleta de papel y pronto llegó a una conclusión. Las cargas tendrían que ser $2/3$ o $-1/3$ de la carga de un protón. La respuesta parecía absurda. «Sería una rareza divertida», comentó Gell-Mann. En física no se había visto nunca una carga que no fuese un múltiplo entero de la carga de un electrón o un protón.

Era una reminiscencia de los días de Pitágoras. Se suponía que todo estaba hecho de múltiplos enteros de cantidades fijas, pero aquí parecía haber algo que troceaba estas unidades básicas. Los nuevos datos venían todavía expresados como cocientes de números enteros, pero nadie había visto nunca estas cargas de valor fraccionario. Aunque al principio Gell-Mann se mostró escéptico sobre estas partículas hipotéticas con cargas fraccionarias, esa misma tarde ya estaban ejerciendo una influencia mágica sobre él. Durante las semanas siguientes empezó a deducir las implicaciones que acarrearían estas ideas, refiriéndose a las partículas como «kworks», palabra que ya había usado otras veces para denotar «cosillas divertidas». Serber pensaba que la palabra era un guiño a la idea de extravagancia que Gell-Mann había mencionado en la comida.

Hojeando la novela experimental *Finnegans Wake* de James Joyce, Gell-Mann encontró un pasaje que determinó cómo se deletrearía la palabra que estaba usando para describir estas partículas hipotéticas. Fue la línea inicial de un poema que ridiculizaba al Rey Marco, el marido engañado en la leyenda de Tristán, la que atrajo su atención: «¡Tres quarks para Muster Mark!».

Dado que había tres de estas nuevas hipotéticas partículas que podrían ser usadas para construir los demás peldaños, la

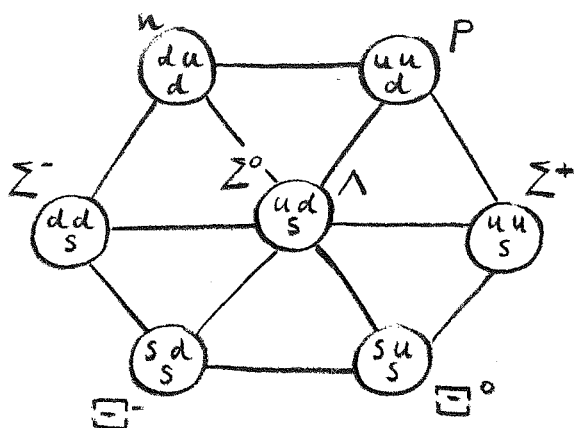
referencia parecía perfecta. El único problema era que Joyce claramente pretendía que la nueva palabra «quark» rimara con «Mark», no con «kwork». Pero la escritura y la pronunciación que Gell-Mann deseaba ganaron la partida.

Estos quarks acabarían siendo lo que ahora creemos que es el último peldaño en la construcción de la materia. Pero costó algo de tiempo que esta idea enraizase. Durante una conversación telefónica con su antiguo director de tesis sobre estos quarks, Gell-Mann tuvo que oír cómo protestaba su interlocutor: «Murray, no bromees... que ésta es una llamada internacional».

Para Gell-Mann estos patrones eran demasiado bonitos como para no esconder tras ellos algo de verdad. La idea era que bajo estos peldaños de partículas había un nuevo peldaño de tres partículas fundamentales: el quark arriba, el quark abajo y el quark extraño, con cargas $2/3$, $-1/3$ y $-1/3$, respectivamente. Las otras partículas estaban hechas a base de combinaciones de estos quarks (y sus antipartículas en el caso de los kaones y piones). El número de quarks extraños en la estructura determinaba la extrañeza de la partícula. Así que podemos rediseñar el óctuple camino basado en el protón, el neutrón y las partículas sigma, xi y lambda tomando como constituyentes estos quarks.

Al recorrer el dibujo con la mirada, vemos que el número de quarks extraños baja en uno en cada paso. Si lo recorremos en la dirección determinada por las cargas crecientes, en cada paso vemos un incremento en el quark arriba, el quark con carga $2/3$. Hay una tercera dirección que da cuenta del incremento en los quarks abajo. Los otros peldaños de partículas presentan particularidades semejantes.

Gell-Mann no era el único que jugaba con la idea de fragmentar la materia en estas partículas más pequeñas. El físico americano George Zweig también creía que estos patrones reflejaban un peldaño más fundamental de partículas. Los llamó ases, y probablemente creía en la realidad física de es-



El óctuple camino con sus quarks constituyentes.

tas partículas más que Serber o Gell-Mann. Los artículos en los que explicaba sus ideas fueron desechados como «un disparate total» por el director del grupo de física teórica del CERN. Incluso Gell-Mann, que había apadrinado ideas similares, no las consideraba otra cosa sino un modelo matemático que introducía un orden coherente en los diagramas que se estaban dibujando. Eran una realidad mnemotécnica, no una realidad concreta. Gell-Mann descartó la creencia de Zweig en la realidad física de estas partículas: «El modelo de quarks concretos es sólo para tontos».

DE LA FANTASÍA A LA REALIDAD

Todo esto cambiaría al aparecer pruebas en los experimentos llevados a cabo a finales de la década de 1960 por los físicos que trabajaban en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, donde se bombardeaba con electrones a los protones. El análisis de la carga del protón revela que puede considerarse que éste tiene un tamaño en torno a los 10^{-15} metros. Se pensaba que el protón estaría distribuido uniformemente a lo largo y ancho de esta pequeña región. Pero cuando

dispararon a los electrones contra la masa del protón, la sorpresa de los investigadores fue mayúscula al ver los patrones de dispersión resultantes. Parecida a la sorpresa que se llevó Rutherford cuando bombardeó los átomos de oro con partículas alfa: resultaba que el protón, como el átomo, estaba hecho mayoritariamente de espacio vacío.

La dispersión observada era compatible con un protón que estuviera formado por tres partículas más pequeñas. Igual que en los experimentos de Rutherford, de vez en cuando uno de los electrones chocaba directamente con una de esas tres partículas más pequeñas y rebotaba hacia la fuente de donde partían los electrones. El experimento parecía confirmar la idea de que el protón estaba hecho de tres quarks. Aunque nunca se hubiera visto un quark suelto, la dispersión de los electrones indicaba que, indudablemente, había tres partículas más pequeñas que formaban el protón.

Resulta que los tontos tenían razón. Los quarks arriba, abajo y extraños no eran solamente un truco mnemotécnico matemático, sino que parecían ser una realidad física. Se descubrió que estos tres quarks no eran suficientes para cubrir todas las nuevas partículas, y finalmente nos hemos encontrado con seis quarks y sus correspondientes antipartículas. Además de los tres bautizados por Gell-Mann, salieron a la palestra otros tres más: el quark encantado, el quark cima y el quark fondo.

El descubrimiento de este método de ordenar la batería de las partículas de la física usando las matemáticas de la simetría es uno de los descubrimientos más fascinantes del siglo xx. Ver estas partículas fundamentales alineándose en diseños que existían ya en la teoría matemática de la simetría tuvo que ser sumamente apasionante. Si me dieran a elegir un descubrimiento de la física que me hubiera gustado hacer, éste estaría de los primeros en la lista. Debió de ser como si un arqueólogo se topase con diseños que hubiera visto ya en otro rincón remoto del mundo. Al ver estos patrones dis-

tintivos, sabría que tendría que haber una conexión entre las dos culturas.

Lo más raro es que esta pirámide de triángulos y hexágonos que dan lugar a diversas representaciones de $SU(3)$ tiende a infinito, lo cual implica que podríamos seguir pegando más y más quarks para construir partículas cada vez más exóticas. El modelo físico parecía agotarse en el peldaño que involucra tres quarks. Pero en 2015 el LHC anunció pruebas apasionantes de la existencia de una partícula hecha de cinco quarks. Los investigadores del CERN casi pasan por alto esta partícula, llamada pentaquark, pensando que era solamente ruido de fondo. Pero cuando intentaron eliminar el ruido, descubrieron una fuerte señal que apuntaba directamente a esta partícula, el siguiente peldaño de la torre de la simetría. Como reconoció uno de los investigadores que trabajaban en el CERN: «No íbamos en busca del pentaquark. Fue la partícula la que salió a nuestro encuentro».

¿Hasta dónde podemos forzar a las matemáticas para hacer predicciones sobre qué otras cosas podríamos ver surgir en el LHC? Hay un objeto simétrico más grande, llamado $SU(6)$, que podría unir a los seis quarks—arriba, abajo, extraño, encantado, cima y fondo—en una fusión de partículas fascinantes. En lugar de los dibujos bidimensionales que hemos usado para reunir entre sí a las partículas en familias, ahora necesitaríamos dibujos en dimensión cinco. Aunque es posible tramar algunas de estas combinaciones más exóticas de quarks, al ser la diferencia entre las masas de los quarks básicos cada vez más grandes, la armoniosa simetría matemática se rompe y la realidad de dichas partículas es cada vez menos plausible. En verdad, el quark cima es tan inestable que se desintegra antes de tener tiempo de fundirse con otro quark. Por qué los quarks tienen unas masas tan diferentes es una cuestión que los físicos no saben—todavía—contestar. Las matemáticas parecen proponer un cóctel de partículas mucho más rico de lo que de hecho puede sustentar la reali-

dad física. La realidad parece un pálido reflejo de lo que podría ser matemáticamente posible. Sin embargo, para comprender la realidad es preciso superar todavía muchos retos.

He de admitir que, a pesar de disponer de una caja con las herramientas que he ido coleccionando durante años, todavía no estoy seguro de saber qué son realmente estos quarks. He estado sentado en el despacho escudriñando libros de física de partículas durante meses—por ejemplo, *Mecánica cuántica y las partículas de la naturaleza*, de Anthony Sudbery—y notas de cursos de posgrado sobre simetría y física de partículas que he descargado de la universidad de Oxford. Y al estar aquí sentado, rodeado por todas estas historias sobre los entresijos de mi dado, a veces me desespero un poco. Porque hay todavía muchas cosas que no conozco: las integrales de camino que describen el futuro de estas partículas, el mecanismo interno de las ecuaciones de Klein-Gordon, qué significan exactamente esos diagramas de Feynman que con tanta facilidad dibujan los físicos en la pizarra. Miro con envidia a mi hijo, que acaba de empezar a estudiar la licenciatura en Física. Él tendrá tiempo para adentrarse en este mundo y conocer estas cosas tan estrechamente como yo conozco el área en la que decidí especializarme.

Lo mismo ocurre con mi violonchelo. Como adulto, añoro tocar las suites de Bach ahora, no dentro de diez años. Pero igual que me costó años aprender a tocar la trompeta, será un período lento, gradual y sostenido de aprendizaje el que me llevará a un punto en el que pueda tocar las suites. Por lo menos he conseguido aprobar el tercer curso este mes. Me sorprendió lo nervioso que estaba. El arco me temblaba en la mano. A pesar de estar rodeado por un montón de niños de once años que esperaban para pasar su examen de primero de flauta, la sensación de conseguir ese logro me resultó muy grata.

Como con el violonchelo, sé que si invierto el tiempo suficiente en este mundo de la física de partículas tendré alguna

esperanza de conocer lo que mis colegas del departamento de física, al otro lado de la calle, viven y respiran diariamente. Me asusta admitir que no tengo tiempo para llegar a saberlo todo. Pero hasta esos físicos a los que envidio por la facilidad con la que juegan con nuestros conocimientos actuales reconocen que nunca sabrán definitivamente y con certeza si lo saben ya todo.

VAQUEROS Y QUARKS

Conseguí concertar una cita con una de las científicas que participó en el descubrimiento de una de las últimas piezas del rompecabezas de los quarks, para ver si los físicos de partículas creen o no que este rompecabezas podría estar hecho de piezas más pequeñas. Melissa Franklin, que es ahora catedrática en Harvard, formaba parte del equipo que detectó el quark cima en el Fermilab, en Estados Unidos. Contrariamente a la percepción popular, descubrir una partícula no consiste en un momento de eureka, sino en una cocción a fuego lento. «Si fuese sólo el bombazo, sería una lata. Te pasas quince años preparando ese momento y luego ¡bum!, ¿se acaba en un minuto? Sería terrible». Probablemente la recogida de datos duró un año, a partir de 1994, hasta que en 1995 el equipo se sintió seguro y decidió confirmar el descubrimiento de esta partícula pronosticada por las matemáticas.

Franklin, sin duda alguna, está más del lado de los físicos experimentales que del lado de los físicos teóricos, las dos facciones en las que se reparten los físicos. Más contenta con un taladro eléctrico que con un lápiz en la mano, ella misma ayudó a construir el detector del Fermilab de principio a fin.

Ambos estábamos invitados a hablar en el Festival de la Ciencia en Roma sobre lo incognoscible, de modo que quedamos en vernos en el vestíbulo del extraño hotel en el que nos hospedábamos, que parecía estar dedicado al deporte del polo. Dado que a Franklin le encanta desfilar por el depar-

tamento con sus botas de vaquera, pensé que podría sentirse más a gusto que yo en este hotel lleno de imágenes de caballos.

Sin embargo, acabó entrando en escena de modo sumamente dramático, ya que se cayó rodando por las escaleras y llegó así hasta el vestíbulo. Se sacudió el polvo, echó a andar de nuevo y se sentó a mi lado como si nada hubiera pasado.

Yo estaba muy interesado en saber si pensaba que los quarks eran el último peldaño o si podría haber más estructuras tras las partículas que ella misma había contribuido a descubrir.

—Hemos alcanzado los 10^{-18} metros. Los siete u ocho órdenes de magnitud siguientes van a ser difíciles de investigar. Pero ciertamente podrían pasar muchas cosas ahí. Lo extraño es que podría morirme antes—sobre todo si me sigo cayendo por las escaleras—, podría morirme antes, digo, de que se avance mucho más.

Le pregunté entonces si no habría límites fundamentales que acotaran lo que podríamos llegar a saber.

—Claramente, hay límites si pensamos en el tiempo que me queda de vida, pero no estoy segura de que haya otros límites. En física experimental, afirmar que es imposible hacer tal o cual cosa es el medio más seguro de que aparezca alguien que sepa cómo conseguirlo. En lo que me queda de vida, estoy segura de que no voy a ser capaz de medir algo que se desintegra en 10^{-22} segundos. No creo tampoco que haya alguna manera de hacerlo. Pero eso no quiere decir que pueda probarse que es imposible.

»No podríamos habernos imaginado el láser o el reloj atómico, ¿verdad? Creo que todas las limitaciones de la física van a ser atómicas, porque todo lo que hacemos lo hacemos con átomos. Ya sé que suena raro, pero en el detector necesitamos los átomos.

Pero lo intrigante es cómo Einstein dedujo la existencia de átomos observando el impacto que ejercen sobre cosas que podemos ver, como los granos de polen o el polvo de carbón. Y hoy sabemos de los quarks al haber visto cómo las partícu-

las rebotan al chocar con los protones. Así que quizá surgirá algún método para cavar más hondo.

—Estoy segura de que hombres como Heisenberg y Bohr no podrían haberse imaginado lo que somos capaces de detectar hoy día. Me parece que lo mismo es aplicable a nuestra generación... aunque seamos mucho más listos—añadió riendo.

Yo creo que éste es el problema que han de afrontar todas las generaciones. ¿Cómo podemos saber qué nuevo método, más astuto, podría desarrollarse para excavar más hondo en la estructura del universo? Pero Franklin se preguntaba cuántas cosas nos pasan desapercibidas y sin embargo están presentes en los datos que produce la actual generación de detectores.

—Muchos de los jóvenes que trabajan en mi área no creen que sea posible descubrir nada nuevo que no haya sido predicho antes por los teóricos. Es triste. Si encuentras algo que no había sido previsto por la teoría, probablemente pienses que está mal y lo descartes, creyendo que no es nada más que una fluctuación. Me preocupa que los experimentos se programen de tal modo que nuestros mecanismos desencadenen algunas cosas, pero solamente las cosas que uno está buscando y no otras. Me pregunto qué se nos estará escapando.

Aventuro que éste fue casi el destino del pentaquark que anunció el CERN hace poco. Por poco lo descartan como si fuera ruido. Dado que yo estaba escribiendo un libro sobre lo que no podemos saber, Franklin tenía curiosidad por preguntarme qué haría frente al siguiente dilema: si fuera posible saberlo todo con apretar un botón, ¿lo apretaría? Cuando estaba a punto de alargar mi mano para apretar este hipotético botón que me ofrecía, y vender así mi alma a Mefistófeles a cambio de conocer las demostraciones de todos los teoremas en los que estoy trabajando, me paró en seco.

—Pues yo no.

—¿Por qué no?—pregunto.

—Porque así no tiene gracia. Para otras cosas a lo mejor sí: si pulsando un botón pudiera hablar un italiano perfecto, lo pulsaría. Pero no para cosas científicas. Creo que es porque de este modo uno no puede llegar a entender la esencia. Para ello hay que luchar un poco. Hay que hacer intentos, mediciones y pelear para entender las cosas.

Me quedé confuso. ¿De verdad no pulsaría el botón para saber si hay o no más partículas detrás de los quarks?

—Si me explicaran el método para descubrirlas, sería magnífico. Una de las razones principales por las que me gusta investigar en ciencia es la emoción de elaborar las ideas. Esa pelea es más interesante. Eso de pulsar el botón y ya está, es lo realmente complicado.

Creo que, en definitiva, lo que le gusta a Franklin es hacer cosas, conducir carretillas elevadoras y taladrar hormigón mientras va en busca de las partículas, y no estar sentada en un despacho pensando.

—Los experimentadores son un poco como vaqueros. Echan el lazo a una cosa por allá y la traen para acá. No se fijan en un chico que está sentado en un rincón pensando cosas.

»Cuando llegue a los sesenta, ya no voy a juzgar tanto y estaré abierta de mente. Dejaré de ser una vaquera... No, la verdad es que no quiero dejar de ser una vaquera... No sé, es difícil... Los vaqueros pueden ser profundos. El llevar botas de vaquera al trabajo es toda una declaración de principios.

Y con esto se subió al taxi y se perdió en el atardecer romano, para continuar con su afán científico por saber que más cosas hay por ahí a las que echar el lazo.

¿EL VIOLONCHELO O LA TROMPETA?

¿Son los quarks que Franklin ayudó a descubrir la frontera final o podrían un día subdividirse en piezas más pequeñas, igual que el átomo se descompuso en electrones, protones y neutrones, que a su vez se subdividieron en quarks?

Muchos físicos opinan que las pruebas experimentales actuales, combinadas con la teoría matemática que sustenta estos experimentos, han respondido a la cuestión de cuáles son las auténticas unidades indivisibles que constituyen mi dado. Igual que la tabla periódica de los 118 elementos químicos podía reducirse a las maneras diferentes de combinar los tres constituyentes básicos del electrón, el protón y el neutrón, los cientos de partículas nuevas descubiertas en las colisiones de los rayos cósmicos podían reducirse a una sencilla colección de constituyentes. La salvaje jauría de partículas había sido domesticada. Pero ¿quién nos asegura que la puerta no volverá a abrirse para liberar más fieras? La verdad es que los físicos no saben si éste será el último capítulo de la historia.

Si observamos el modelo simétrico que rige estas partículas, el triángulo correspondiente a los quarks es el último peldaño indivisible que describe las diferentes representaciones físicas del objeto $SU(3)$. Las matemáticas de la simetría sugieren que hemos alcanzado el límite. El triángulo correspondiente a los quarks es el peldaño indivisible con el que se construyen los demás peldaños. Así que las matemáticas de la simetría están tratando de decirnos que hemos llegado a lo indivisible. Y sin embargo, quizá estamos cayendo en la misma trampa en la que cayó Gell-Mann cuando descartó los quarks porque debían tener carga fraccionaria. Pero hay otra característica de los quarks y de los electrones que justifica la creencia de que podrían ser indivisibles: parece que no ocupan espacio, ya que se comportan como si estuvieran concentrados en un punto.

En matemáticas, la geometría está hecha de sólidos tridimensionales, planos bidimensionales, líneas unidimensionales y puntos cerodimensionales. Lo extraño es que se suponía que todos éstos eran objetos abstractos que no tenían entidad física en nuestro mundo tridimensional. ¿Qué es en realidad una línea? Si dibujamos una raya en una hoja de papel y la miramos con el microscopio, veremos que de hecho tie-

ne cierta anchura. No es realmente una línea. De hecho, tiene incluso altura, porque los átomos que están sobre la hoja se amontonan creando una diminuta cordillera de grafito (o de lo que sea que lleven hoy en día las minas de los lapiceros) que atraviesa la página.

Igualmente, un punto del espacio podría quedar identificado por sus coordenadas en el GPS, pero nadie espera que un objeto esté localizado solamente en este punto y en ningún otro sitio. Ni siquiera lo veríamos. Sus dimensiones son cero. Y sin embargo, el electrón se comporta en muchos aspectos como si estuviera concentrado en un punto del espacio, y lo mismo los quarks que hay dentro del protón y del neutrón. La manera en que se dispersan los electrones cuando encuentran otro electrón o los quarks que hay dentro de los protones y de los neutrones tiene sentido solamente si creamos un modelo en el que todas estas partículas carecen de volumen. Si les diéramos volumen, la dispersión sería diferente. Y si fueran realmente partículas puntuales, no deberíamos esperar que sea posible disgregarlas.

¿Y cómo interpretar que los electrones tienen masa? ¿Cuál es la densidad de un electrón? Su masa dividida por su volumen. Pero el volumen es cero. Si dividimos por cero, la respuesta es infinito. ¿Infinito? ¿Entonces cada electrón produce un diminuto agujero negro? Estamos metidos de lleno en el terreno del mundo cuántico, porque la cuestión de saber dónde está localizada una partícula resulta que no es tan fácil de responder como uno creería, como descubriremos en la siguiente «frontera».

¿Se impondrán finalmente las notas discretas de mi trompeta al *glissando* continuo del violonchelo? Será muy difícil saber si esta historia ha llegado a su fin. Se pensó que los átomos eran indivisibles a causa de la naturaleza indivisible de los números enteros que mostraron cómo se combinan entre sí. Y sin embargo, finalmente se disgregaron en piezas diminutas que son las que dan cuenta de nuestra concepción

actual del universo. ¿Por qué íbamos a pensar que la historia no se puede repetir otra vez y que no aparecerán nuevas sorpresas si seguimos excavando más y más? ¿Por qué tiene que haber un comienzo, un primer eslabón a partir del cual surge todo? Es el clásico y recurrente problema de la regresión infinita. Como replicó aquella viejecita a los intentos de un científico de ridiculizar su teoría de que el universo se apoyaba en el caparazón de una tortuga gigante: «Es usted muy inteligente, joven, muy inteligente, pero ¡cada tortuga descansa sobre otra tortuga!».

Incluso en el caso de que los electrones y los quarks sean partículas concentradas en un solo punto del espacio, no hay ningún motivo por el que un punto no pueda estar hecho en realidad de dos puntos. O quizá hay dimensiones ocultas con las que tenemos que aprender a interactuar. Esto es lo que propone la teoría de cuerdas. Dicha teoría explica que estas partículas puntuales son de hecho cuerdas unidimensionales que vibran con frecuencias resonantes, y las diferentes frecuencias originan las diferentes partículas. Me parece que he completado el círculo y que he vuelto al modelo del universo de Pitágoras. Quizá mi violonchelo se impondrá sobre la trompeta y las partículas fundamentales son realmente cuerdas vibrantes.

Como voy en busca de cosas que nunca sabremos, es posible que la cuestión de entender de qué está hecho mi dado encaje en esta categoría. La historia de lo que sí sabemos sobre el dado está llena de avisos. ¿Llegaremos alguna vez a un punto en el que no queden más peldaños de la realidad por descubrir? ¿Sabremos alguna vez que la teoría más reciente es la teoría definitiva?

Sin embargo, puede haber otro problema. La teoría actual de lo muy pequeño—la física cuántica—propone que hay límites al conocimiento inmersos en la propia teoría. Al tratar de dividir el dado más y más, en algún momento me enfrentaré a una barrera que no podré traspasar, como se explica en la siguiente «frontera».

TERCERA FRONTERA:
EL POMO DE URANIO

Para el progreso en la ciencia, es absolutamente imprescindible preservar la incertidumbre como parte fundamental de nuestra naturaleza íntima.

RICHARD FEYNMAN

Es asombroso lo que uno puede comprar a través de internet. Hoy me ha llegado por correo un pequeño pomo con uranio-238 radiactivo. «Útil para realizar experimentos nucleares», aseguraba el prospecto. Disfruté mucho con los comentarios de otros compradores: «Menos mal que ya no tengo que comprar esto a los libios en los aparcamientos de los centros comerciales». Había un comprador que no se mostraba tan satisfecho: «Compré este pomo hace 4.470 millones de años y cuando lo he abierto hoy, lo he hallado medio vacío».

El uranio se encuentra en la naturaleza y me aseguraron que no pasa nada por tenerlo aquí a mi lado, sobre la mesa de trabajo, mientras escribo. La documentación solamente avisa de que no es buena idea molerlo y tragárselo. En el paquete informan de que el uranio emitirá radiaciones a un ritmo de 766 cuentas por minuto. Expele todo un abanico de radiaciones: partículas alfa y beta, y rayos gamma. Pero lo que las instrucciones no pueden precisar es cuándo el uranio va a escupir la próxima partícula.

De hecho, la física cuántica vigente asegura que esto es algo imposible de saber. Hasta el momento no existe ningún mecanismo conocido que prediga con precisión cuándo el uranio radiactivo va a emitir radiación. La física postnewtoniana que exploramos en la primera «frontera» implicaba que teóricamente todas las cosas del universo obedecen a un

conjunto de ecuaciones matemáticas deterministas y están controladas por ellas. Pero a principios del siglo xx, un grupo de jóvenes físicos—Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Einstein y otros—promovieron una revolución, proporcionando una nueva perspectiva sobre lo que realmente podemos saber del universo. El determinismo quedó descartado. Parece que la aleatoriedad es la que lleva la batuta.

Comprender este misterio exige dominar una de las teorías más difíciles y contraintuitivas que existen en los anales de la ciencia: la física cuántica. Escuchar a los que han pasado su vida inmersos en este mundo cuando explican las dificultades que han tenido que superar para comprender sus sutilezas da fe del reto que asumo. Después de llegar a sus descubrimientos pioneros en física cuántica, Werner Heisenberg recordaba: «Me repetía una y otra vez la misma pregunta: ¿puede la naturaleza ser realmente tan absurda como muestran estos experimentos atómicos?». Acerca de la teoría, Einstein declaró: «Si es correcta, significa el fin de la ciencia». Schrödinger estaba tan traumatizado por las consecuencias de lo que había urdido que admitió: «No me gusta y lamento tener algo que ver con ella». Sin embargo, la teoría es una de las parcelas más poderosas y mejor comprobadas de la ciencia, tal y como aparece en los libros. No ha habido nada que se haya acercado siquiera a desplazarla del pedestal que ocupa como uno de los logros científicos más grandes del siglo xx. Así que no queda más remedio que zambullirse de cabeza en este mundo incierto. Feynman tiene un buen consejo para mí a la hora de embarcarme en estas indagaciones cuánticas:

Voy a contarles cómo se comporta la naturaleza. Si ustedes simplemente aceptan que las cosas pueden ser así, les va a parecer espléndido y maravilloso. Si pueden evitarlo, no insistan en preguntarse: «¿Cómo es posible?», porque se meterán en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible.

RADIACIÓN ALEATORIA

La revolución que desencadenaron estos científicos está perfectamente condensada en mis intentos por comprender qué va a hacer de un momento a otro mi pomo de uranio.

Durante un período largo de tiempo, el ritmo de desintegración radiactiva se aproxima a una constante y es muy predecible de media, exactamente igual que las tiradas del dado de casino. Pero según la física del siglo XX, hay una diferencia fundamental entre el dado y el pomo de uranio. Con el dado, al menos uno tiene la impresión de que podría saber el resultado si tuviera los datos suficientes. Sin embargo, parece que no hay manera de determinar cuándo el uranio va a emitir una partícula alfa. Según el modelo vigente de la física cuántica, es algo completa y genuinamente aleatorio. Es un contraejemplo a la creencia de Laplace en un universo mecánico.

Para cualquiera que busque certezas y conocimientos, las revelaciones de la física cuántica son terriblemente desalentadoras. ¿No podemos hacer nada para saber cuándo el pomo que tenemos sobre la mesa va a emitir la siguiente partícula alfa? Esto resulta muy chocante. ¿No hay realmente ningún modo de saberlo? Sobre esto hay mucho debate; no hay acuerdo sobre si es algo verdaderamente aleatorio o si existe un mecanismo oculto que todavía no hemos descubierto y que desvelaría el momento en el que va a producirse la radiación.

Este desconocimiento está relacionado con un peldaño todavía más profundo de ignorancia que envuelve al universo de lo muy pequeño. Para aplicar las ecuaciones del movimiento descubiertas por Newton al cálculo de la evolución futura del universo, es preciso saber la localización y el momento de todas las partículas del mismo. Por supuesto, en la práctica esto es imposible, pero los descubrimientos que se han hecho en el siglo XX apuntan a un problema más profundo. Aunque tomemos solamente un electrón, es imposible saber a la vez su posición y su momento con precisión.

Nuestro modelo vigente de lo muy pequeño tiene una limitación intrínseca para lo que podemos saber: esto es lo que se llama el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Mientras que, según vimos en la primera «frontera», la aleatoriedad que supuestamente describe las tiradas del dado es simplemente una expresión de una falta de conocimiento, el mundo de lo muy pequeño parece llevar el azar insertado en lo más íntimo: un dado imposible de conocer que decide lo que le va a pasar a ese trozo de uranio que descansa sobre la mesa, al lado del dado de casino.

Me he resignado a aceptar la incognoscibilidad de las tiradas del dado, porque en el fondo de mi corazón sé que danzan al son de los latidos regulares de las ecuaciones de Newton. Pero no estoy seguro de que pueda alguna vez conformarme con la impredecibilidad del pomo radiactivo de uranio, que en teoría danza sin orden ni concierto. Éste es el reto: ¿será siempre imposible de conocer, o ha de producirse otra evolución teórica, afín a la perspectiva radicalmente nueva que nació a principios del siglo xx?

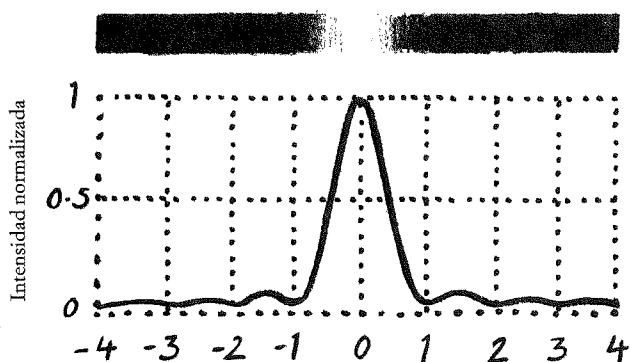
¿ONDA O PARTÍCULA?

Los primeros atisbos de esta revolución aparecieron cuando los científicos trataron de comprender la naturaleza de la luz. ¿Es una onda o una partícula? La gran obra de Newton sobre óptica, publicada en 1704, describía la luz como si fuera una partícula. Si consideramos la luz como un flujo de partículas, el comportamiento que describe Newton en su libro parece bastante natural. Pensemos en cómo se refleja la luz. Si queremos saber la dirección que tomará un rayo de luz que incide sobre una superficie reflectante, tendremos una pista para predecirlo si pensamos en él como en una bola de billar que rebota contra una pared. Newton creía que la geometría de la luz, compuesta por estas líneas rectas, solamente podía explicarse si la luz estaba hecha de partículas.

Por el contrario, los que se oponían a la visión de Newton pensaban que la onda era un modelo mucho mejor para describir la naturaleza de la luz. Parecía que había muchos rasgos característicos de la luz que eran difíciles de explicar si ésta fuera una partícula. Un experimento concebido por el físico inglés Thomas Young a principios de 1800 resultó ser la puntilla para todos aquellos que creían que la luz era una partícula.

Si iluminamos una pantalla con una fina rendija vertical y colocamos una placa fotográfica detrás para registrar cómo resurge la luz a través de la rendija, el patrón que se observa sobre la placa fotográfica es una región brillante justo en línea con la rendija y una fuente de luz que va muriendo según nos alejamos de esta línea central. Hasta el momento, esto es perfectamente compatible con una visión de la luz como partícula, ya que podrían producirse pequeños desvíos de las partículas de luz al atravesar la rendija, lo que causaría que parte de la luz fuera a parar fuera de la zona brillante. (Incluso con una sola rendija, si ésta es pequeña comparada con la longitud de onda de la luz, se producen pequeñas variaciones, en forma de ondas, en la intensidad de la luz, a medida que uno se aleja de la región central brillante, lo que apunta a que interviene algún tipo de onda).

El problema de la hipótesis de la luz como partícula se puso de manifiesto cuando Young introdujo en la pantalla una segunda ranura vertical paralela a la primera. Lo que se esperaba en este caso es que aparecieran dos regiones brillantes alineadas con cada una de las rendijas, correspondientes a las partículas que pasaran por la una o por la otra. Pero no fue esto lo que vio Young, sino una serie de bandas de líneas brillantes y oscuras por toda la placa fotográfica. Lo más raro era que había zonas de la placa que aparecían iluminadas cuando solamente estaba abierta una de las rendijas y que se sumían en la oscuridad cuando estaban abiertas ambas. Si la luz es una partícula como una bola de billar, ¿cómo

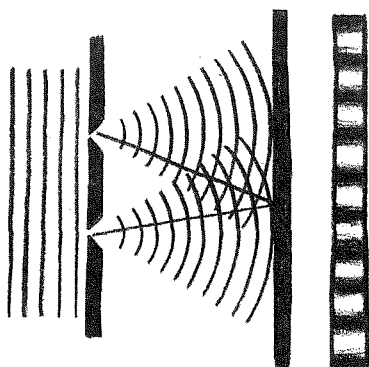


Intensidad de la luz registrada en la placa fotográfica después de pasar por una fina rendija.

puede ser que al darle más opciones resulte que la partícula sea de repente incapaz de alcanzar estas regiones de la placa? Ciertamente, el experimento puso en jaque la teoría de Newton de la luz como partícula.

Parecía que solamente un modelo de la luz basado en ondas podría explicar estas bandas brillantes y oscuras. Si nos imaginamos un lago con las aguas en calma al que lanzamos dos piedras a la vez, las ondas producidas por las piedras interactúan de tal modo que parte de las ondas se combinan para generar una onda más grande y parte se cancelan mutuamente. Si colocamos un trozo de madera en el agua, veremos esta interacción en forma de combinaciones de ondas que llegan hasta la madera. Estas olas vapulean la madera con una serie de crestas y valles que recorren toda la longitud de la tabla.

La luz que emerge de las dos rendijas parece producir dos ondas que interactúan de un modo parecido a lo visto cuando se arrojan piedras al agua. En algunas zonas las ondas de luz se combinan para crear bandas brillantes y en otras se cancelan mutuamente para producir bandas oscuras. Ninguna versión de la luz basada en partículas puede siquiera aspirar a explicar estos patrones.



La luz emitida por la izquierda pasa a través de la doble rendija y alcanza la placa fotográfica a la derecha. Las bandas brillantes y oscuras mostradas a la derecha de la placa representan el patrón de interferencias detectado.

Los defensores de la teoría basada en partículas tuvieron que tirar finalmente la toalla a principios de la década de 1860, cuando se descubrió que la velocidad a la que viaja la luz coincide exactamente con la velocidad pronosticada por la nueva teoría de las radiaciones electromagnéticas, basada en ondas, desarrollada por James Clerk Maxwell. Los cálculos de Maxwell desvelaron que la luz era de hecho una forma de radiación electromagnética, descrita por ecuaciones cuyas soluciones eran ondas de diferentes frecuencias, correspondientes a diferentes tipos de radiación electromagnética.

Sin embargo, quedaba una vuelta de tuerca. Igual que el experimento de Young parecía empujar a los científicos a adoptar un modelo de la luz basado en ondas, los resultados de dos nuevos experimentos realizados a finales del siglo XIX solamente podían explicarse si la luz viajaba en paquetes. O sea, si estaba cuantizada.

El primer atisbo de que la luz no podía ser una onda surgió cuando se trató de comprender la luz de las radiaciones electromagnéticas que se producen en los hornos, alimentados con carbón, que impulsaron la revolución industrial. El calor es movimiento, pero si sacudimos un poco un electrón, al tener éste carga negativa, emitirá una radiación electromagnética. Por eso brillan los cuerpos calientes: los electrones sacudidos emiten radiación. El electrón sería como una persona que sostiene uno de los extremos de una comba: cuando su mano empieza a subir y bajar, la cuerda comienza a oscilar como una onda. Cada onda posee una frecuencia que registra cuántas veces sube y baja por segundo. La frecuencia es la que controla, por ejemplo, el color visible que presentará la luz. La luz roja es de baja frecuencia; la azul, de alta frecuencia. La frecuencia refleja también cuánta energía contiene la onda. Cuanta más frecuencia, más energía. El otro factor que contribuye a definir la energía de una onda es su amplitud, que mide lo grande que es aquélla. Si pensamos en la analogía de la comba, vemos que cuanto más energía empleemos, más alta vibrará la cuerda. Durante siglos, los científicos usaron la frecuencia dominante de la radiación para medir la temperatura: rojo vivo, blanco candente. Cuanto más calor contiene el fuego, más alta es la frecuencia de la luz que emite.

Tuve la oportunidad de ver en funcionamiento uno de estos hornos alimentados a base de carbón cuando visité la Estación de Bombeo de Papplewick, cerca de Nottingham. Una vez al mes encienden los hornos con ocasión de sus «días del vapor». El horno se encuentra en un edificio victoriano ricamente ornamentado. Por lo visto, el coste de construir la estación fue tan bajo comparado con el presupuesto previsto que quedaron fondos abundantes para decorar la casa de bombeo, que semeja una iglesia dedicada, en vez de a Dios, a la ciencia de la era industrial.

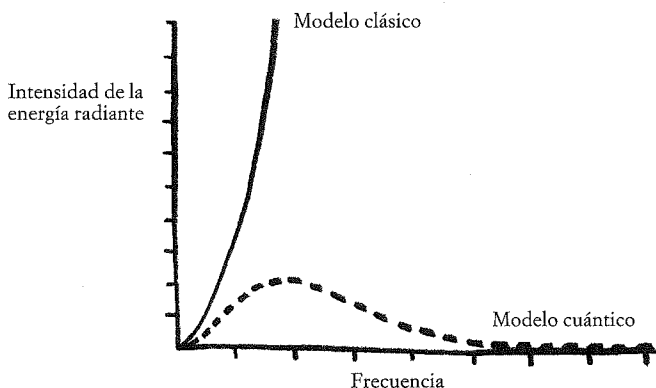
La temperatura dentro del horno de Papplewick se aproxima a los 1.000 grados. Los científicos de finales del siglo XIX estaban interesados en hacerse una idea del espectro de frecuencias de la luz que emitía el horno a diferentes temperaturas. Un horno cerrado puede alcanzar un equilibrio termodinámico, cuando el calor que sacude a los átomos hace que se produzca una radiación que es reabsorbida a continuación, de modo que no se pierde nada de la radiación electromagnética.

Cuando el horno alcanza el equilibrio, ¿qué frecuencias de radiación se encuentran en él? Podemos imaginar que esta situación es análoga a la de las cuerdas del violonchelo que están esperando para vibrar. La energía total de la cuerda vibrante depende de la frecuencia y la amplitud de la vibración. Las ondas de alta frecuencia precisan de mayor energía para mantenerse, pero esto puede compensarse creando una onda con amplitud más pequeña. Según el modelo clásico, una cantidad fija de energía puede mantener teóricamente a las ondas vibrando a cualquier frecuencia, pero la amplitud será cada vez más pequeña a medida que aumente la frecuencia.

Un análisis teórico del espectro parecía indicar que en el horno surgían ondas de frecuencias arbitrarias. Sin embargo, cuando me acerqué al de Papplewick no quedé pulverizado por una descarga de rayos x de alta frecuencia. Aunque la teoría del electromagnetismo basada en las ondas preconizaría exactamente eso. Y no sólo eso, sino que al sumar todas las frecuencias que hay en el horno en el punto de equilibrio térmico, el análisis basado en la luz como onda nos llevaría a la conclusión absurda de que la energía total contenida en él es infinita. Si esto fuera así, la caldera de Papplewick no habría durado mucho.

A una temperatura cualquiera dada, parece que existe una frecuencia límite de corte a partir de la cual las ondas no pueden seguir vibrando. La descripción clásica de esta situación

es la siguiente. Si la luz se pareciera a una cuerda vibrante del violonchelo, el horno engendraría ondas de todas las frecuencias, y el número de ondas aumentaría con la frecuencia. Para las frecuencias bajas la gráfica es correcta, pero al aumentar la frecuencia, la intensidad de la radiación se va reduciendo, hasta que se alcanza un valor (que depende de la temperatura) a partir del cual no se detectan ondas con frecuencia superior a ese valor.



Las frecuencias en un horno cerrado previstas por modelos clásicos y por modelos cuánticos.

En 1900, el físico alemán Max Planck consideró la distribución, obtenida experimentalmente, de las frecuencias presentes en un horno como el de Papplewick y llegó a la brillante idea que explicaría cómo conseguir la auténtica gráfica y no la gráfica absurda producida por la interpretación de la luz inspirada por las clásicas cuerdas del violonchelo.

Postuló que cada frecuencia de la radiación electromagnética requería una energía mínima para arrancar. No era posible reducir de modo continuo la energía de una onda que vibrara con una cierta frecuencia de modo que siguiera funcionando eternamente. En algún punto, al reducir la energía, la onda simplemente moriría, en lugar de seguir vibrando.

do con amplitud cada vez más pequeña. De hecho, el modelo de Planck sostenía que no había un comportamiento continuo. Cada vez que aumentaba la energía lo hacía en saltos cuantizados. Los saltos de energía eran muy pequeños, y por eso eran muy difíciles de observar a menos que uno los buscara expresamente. Pero una vez que Planck formalizó su hipótesis, las implicaciones matemáticas para los valores de la intensidad de la radiación electromagnética a una temperatura dada correspondían con precisión a las radiaciones observadas en el horno.

Así que a la postre el universo no era el lugar liso y continuo que habían imaginado los científicos hasta finales del siglo XIX. Ni siquiera los atomistas, que eran los que creían que la materia estaba compuesta de constituyentes básicos, concibieron la idea de que la filosofía atomista pudiera ser aplicable a cosas como la energía. Esto implica, en lo que afecta a las cuerdas del violonchelo, que si deslizamos el arco sobre la cuerda y aumentamos el volumen, aunque el oído perciba un aumento continuo y gradual del sonido, de hecho éste aumenta a saltos. Saltos muy pequeños. Para cualquier frecuencia dada ν , la energía aumenta en saltos de $h \times \nu$, donde h es la llamada constante de Planck. Este número, que controla los saltos de energía medidos en julio segundos, tiene 33 ceros después de la coma decimal antes de llegar al primer dígito no nulo:

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ julio segundos}$$

En aquel momento, Planck no tenía ninguna explicación física de los saltos de la energía, pero matemáticamente era justo lo que se necesitaba para describir las radiaciones electromagnéticas observadas de manera experimental en un horno como el de Papplewick. Fue la explicación que dio Einstein a un segundo experimento lo que inclinó a los científicos a pensar en la luz como partícula más que como

onda. Y estas partículas eran las que tenían individualmente la energía $h \times \nu$.

EXPELIENDO ELECTRONES: EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Los metales son tan buenos conductores de la electricidad porque poseen multitud de electrones libres que pueden moverse en su interior. Esto significa que si descargamos una radiación electromagnética sobre un trozo de metal podemos conseguir ciertamente expulsar a los electrones de éste. La energía de la onda se transfiere al electrón, que tiene entonces la energía suficiente para escapar de los confines del metal. Ésta fue la clave del proceso que llevó a Thomson al descubrimiento del electrón, descrito en la «frontera» anterior.

Si imaginamos que la radiación electromagnética es una onda, podríamos aumentar la energía de la onda hasta conseguir finalmente expulsar al electrón. Cuanto mayor sea la energía de la onda, mayor será la sacudida que reciba el electrón y a mayor velocidad saldrá expulsado. Como expliqué en la sección anterior, hay dos modos de aumentar la energía de una onda como la que produce la cuerda del violonchelo. Una es aumentar la frecuencia de la onda, para que vibre más deprisa. Al hacer esto, casi seguro que la velocidad de los electrones expelidos aumentará proporcionalmente. Pero si fijamos la frecuencia, el otro modo de aumentar la energía es aumentar la amplitud de onda. Lo extraño es que, a pesar de aumentar la intensidad de la onda con una frecuencia dada, no varía la velocidad a la que los electrones salen expelidos. Lo que aumenta es el número de electrones expulsados del metal.

Es más, si disminuimos la frecuencia de la onda al mismo tiempo que aumentamos su amplitud, podemos conseguir que la energía total se mantenga, pero llega un momento en el que parece que no conseguimos expulsar ningún elec-

trón. Existen frecuencias por debajo de las cuales, por muy alto que toque el violonchelo, la energía no consigue expeler electrones. Por el contrario, con una onda de alta frecuencia, por mucho que bajemos el volumen, hasta una onda con una intensidad sumamente baja tiene el poder de expulsar electrones. ¿Qué está pasando? ¿Cómo se explica este extraño comportamiento, al que los científicos llaman efecto fotoeléctrico?

La respuesta implica cambiar de modelo. Hasta el momento hemos estado pensando en términos de una onda que llega y una partícula que sale. ¿Qué tal si pensamos en términos de una partícula que entra y otra que sale? Quizá la naturaleza como partícula del electrón saliente sea de hecho la clave para interpretar la radiación electromagnética entrante.

Éste fue el gran cambio de paradigma que impulsó Einstein en 1905, año que muchos llaman su *annus mirabilis*. Ese mismo año desarrolló la teoría especial de la relatividad, de la que hablaremos en próximas «fronteras», y la teoría del movimiento browniano, que proporcionó la prueba más convincente de que la materia está compuesta por átomos, como se explicó en la «frontera» anterior.

Einstein propuso que pensáramos en la radiación electromagnética como si consistiera, no en una onda, sino en una lluvia de diminutas bolas de billar, exactamente igual que había sugerido Newton. La energía de cada partícula individual depende de la frecuencia de la radiación. Con esta nueva idea tenemos un modelo que puede describir perfectamente lo que los científicos estaban experimentando en el laboratorio. Cada bola de billar de luz tendrá la energía correspondiente a la mínima energía que Planck había introducido matemáticamente para conseguir su explicación de la radiación en los hornos. En el modelo de Einstein, la radiación electromagnética de frecuencia ν hay que interpretarla como bolas de billar con una energía $h \times \nu$ cada una. Los saltos de ener-

gía que Planck introdujo corresponden simplemente a la adición de más bolas de billar de luz a la radiación. Einstein llamó a estas bolas cuantos de luz, pero fueron rebautizadas a mediados de la década de 1920, y hoy las conocemos como fotones.

UN BILLAR DE FOTONES

¿Cómo explica este modelo de la luz formada por partículas el fenómeno de la expulsión de electrones de un metal? De nuevo hay que imaginar que esta interacción es como un juego de billar. Los fotones de la luz vienen a estrellarse contra la superficie del metal. Si un fotón choca contra un electrón, éste hereda la energía del fotón y sale despedido. Pero el electrón necesita recibir una cantidad dada de energía para poder abandonar el metal.

La energía de cada fotón que llega depende solamente de la frecuencia de su radiación. Si ésta es muy pequeña, la energía de cada fotón que llega es demasiado pequeña para expulsar al electrón. No importa que aumentemos la intensidad de la radiación: al hacerlo estaremos disparando más bolas de billar sobre el metal, pero cada bola individual tendrá la misma energía. La probabilidad de que un electrón sea alcanzado aumenta, pero dado que cada bola de billar es tan impotente como cualquier otra a la hora de desplazar al electrón, éste nunca es desplazado. En el modelo basado en ondas, el electrón puede esperar absorbiendo la energía que llega hasta disponer de la suficiente para salir disparado. Con el modelo basado en partículas, un electrón puede ser golpeado todas las veces que uno quiera, pero ninguno de los choques individuales será suficiente para expulsarlo. Es como empujar suavemente a alguien con un dedo. Por mucho que lo intentemos, nunca podremos tumbar a una persona.

No obstante, si la frecuencia de la radiación que llega está por encima de un cierto valor, la energía de cada bola de

billar es suficiente para desplazar al electrón de su puesto. Es como sustituir cientos de pequeños empujoncitos por un buen empujón: ahora sí que derribaremos a la persona. Esencialmente, la bola tiene suficiente energía para transmitir al electrón, y la energía resultante del electrón es suficiente para que éste pueda compensar las fuerzas que lo atan al metal. Aumentar la intensidad de la radiación significa lanzar más bolas sobre el metal y esto simplemente aumenta el número de electrones expelidos. De modo que, en vez de ver que se expelen electrones a mayor velocidad, lo único que vemos es que son expelidos más electrones.

En el modelo de Einstein, la velocidad del electrón emitido será linealmente proporcional a la frecuencia. Lo más interesante es que esta relación no había sido observada ni predicha previamente, de modo que confirió al modelo de Einstein el rasgo característico perfecto de cualquier teoría científica buena: ser capaz no solamente de explicar lo que se ha visto en el laboratorio hasta la fecha, sino también de predecir algún fenómeno nuevo que puede ser comprobado posteriormente. En el caso que nos ocupa esto era especialmente importante, ya que había muchos científicos que dudaban de la validez del modelo de Einstein. Las ecuaciones de Maxwell, que describían la radiación electromagnética en términos de las matemáticas de las ondas, habían tenido tanto éxito que los científicos no iban a cambiar de opinión sin que se les convenciera debidamente.

Uno de los más escépticos era el físico estadounidense Robert Andrews Millikan. Pero sus intentos por descartar el modelo de Einstein para la luz, basado en las bolas de billar de energía, acabaron por confirmar lo que Einstein había pronosticado, o sea, que la velocidad de los electrones despedidos era directamente proporcional a la frecuencia de la radiación entrante. En su carrera investigadora, Millikan ya había determinado la carga del electrón y acabaría acuñando la expresión «rayos cósmicos» después de probar que la ra-

diación recogida en los detectores de la Tierra provenía del ámbito extraterrestre. Por todos estos trabajos, Millikan recibió el Premio Nobel de Física en 1923, justo dos años después de que Einstein recibiera el suyo.

Einstein fue galardonado con el Premio Nobel en 1921 por su explicación del efecto fotoeléctrico. ¡El comité del Nobel no se lo dio en reconocimiento de su teoría de la relatividad! Las ideas de Einstein proporcionaron un motivo a los partidarios de las partículas para recoger la toalla que habían arrojado unas décadas antes, después de los descubrimientos de Maxwell. En su momento se produciría una contrarrevolución que revelaría que las partículas como los electrones poseen rasgos característicos que las aproximan más a las ondas que a las partículas discretas. Parecía que tanto la luz como los electrones se comportaban a la vez como partículas y como ondas. Todos eran ganadores en la nueva teoría que empezaba a florecer.

A pesar del cambio de paradigma de Einstein, los experimentos que mejor parecían explicar que la luz es una onda no quedaron invalidados. Lo más extraño era que las circunstancias del experimento parecían dictar el modelo de luz que convenía usar. La dualidad onda-partícula estaba ya ahí.

Recordemos que fue el experimento de la doble rendija de Young el que supuso una demostración abrumadora de que la luz es una onda y no una partícula. El efecto fotoeléctrico había usado muy ingeniosamente la naturaleza del electrón como partícula para proporcionar pruebas convincentes de que la radiación electromagnética puede interpretarse como una partícula. Pero ¿funcionaba también este diálogo en la otra dirección? ¿Qué pasaría si introducimos electrones en el experimento de la doble rendija de Young? La idea de bombardear con electrones una pantalla con dos rendijas trajo consecuencias chocantes para nuestra interpretación de la realidad.

EXPERIMENTOS CON ELECTRONES

Una de las consecuencias más curiosas de la física cuántica es que una partícula como un electrón puede estar aparentemente en más de un sitio a la vez hasta que es observada, momento en el que parece hacer una elección aleatoria para decidir en qué sitio se halla. Y los científicos creen por el momento que esta elección es genuinamente aleatoria, no que esté causada por una falta de información. Si se repite el experimento exactamente bajo las mismas condiciones, se pueden obtener cada vez resultados diferentes. A la postre, esta incertidumbre en lo que respecta a la posición es la responsable de que haya porciones de uranio que se encuentren de repente fuera del pomo que tengo encima de la mesa.

La ilustración de la quintaesencia de este fenómeno se halla de nuevo en el experimento de la doble rendija de Young, pero con electrones en vez de luz. Un físico colega mío en Oxford dejó que me divirtiera un poco en su laboratorio para que pudiera ver con mis propios ojos el extravagante juego al que estos electrones parecen entregarse. He leído muchas veces sobre esto, pero como dijo una vez Kant: «Todos nuestros conocimientos nacen de los sentidos».

Me sentí obligado a confesarle a mi compañero que los experimentos y yo no hacíamos muy buenas migas. Nadie quería ser mi pareja en el laboratorio del colegio porque siempre me salían mal. Ésta fue una de las razones por las que acabé en el extremo más teórico del espectro científico, donde la maraña del mundo físico puede mantenerse más o menos a raya. Pero mi compañero me aseguró que este experimento estaba muy sólidamente diseñado.

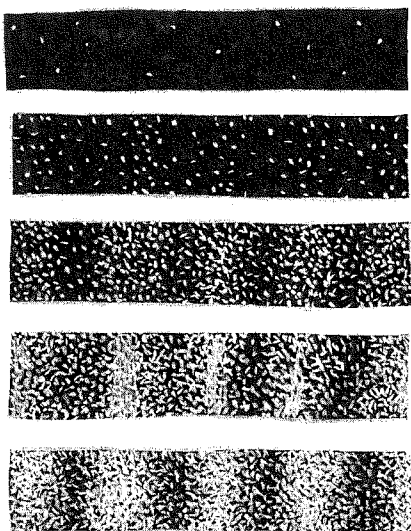
Para empezar, pusimos en marcha una fuente que emitía electrones a una velocidad que me permitía registrar cómo llegaban uno a uno a la placa detectora. Coloqué entonces la pantalla con las dos rendijas entre la fuente de emisión y la placa detectora. Primero observé lo que sucedía cuando estaba cerrada una de las rendijas. Los electrones que pasaban

a través de la rendija abierta llegaban hasta la placa detectora, y una vez que hube enviado un número suficiente de electrones, empecé a ver cómo surgía un patrón.

La zona que estaba directamente alineada con la fuente emisora y la rendija mostraba una alta intensidad de llegada de electrones. Al alejarse de esta línea central hacia cualquiera de sus lados, se seguían detectando electrones que llegaban, pero su número disminuía cuanto más nos alejábamos de ésta. Algunas veces parecía que los electrones eran desviados al pasar por la rendija, de manera que su trayectoria se curvaba y acababan a uno u otro lado de la línea central. Hasta este momento, nada demasiado extraño. Pero entonces abrí la segunda rendija.

Si los electrones se comportaran como auténticas partículas, lo que cabría esperar es ver dos zonas de alta intensidad alineadas con una u otra de las rendijas, según los electrones pasaran por una u otra de ambas rendijas. Pero no fue esto lo que vi. Lo que vi es que empezaba a surgir un patrón de interferencias, exactamente igual que Young cuando arrojó luz sobre la pantalla, fenómeno que resulta mucho más compatible con la analogía de una ola de agua que pasa a través de las rendijas y que crea dos olas que interfieren entre sí.

Recuérdese, sin embargo, que habíamos ajustado el experimento de modo que los electrones iban pasando de uno en uno a través de la pantalla. De modo que no había varios electrones pasando a la vez y que pudieran interactuar entre sí como hacen las olas. Era un solo electrón el que hacía lo mismo que hace una ola. Lo que resultaba todavía más inexplicable era que había zonas en la placa detectora a las que no llegaba ningún electrón, mientras que, con una sola rendija abierta, a estas zonas también llegaban electrones. ¿Qué ocurría? Había abierto la otra rendija, proporcionando un nuevo camino hacia un mismo punto de la placa detectora, pero con esta opción extra, resulta que ahora no llegaba ningún electrón a ese punto.



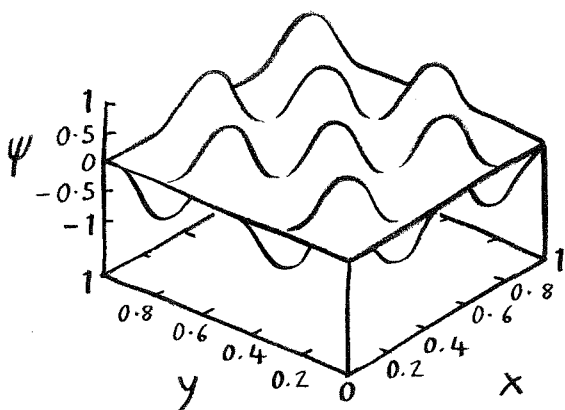
Al ir detectándose más electrones, va surgiendo un patrón de interferencia que recuerda a las olas.

Kant sostuvo que todos nuestros conocimientos provienen de los sentidos, pero «a partir de ahí pasan a nuestra comprensión, y terminan en nuestro razonamiento, momento a partir del cual nada puede añadirse». ¿Cómo hicieron entonces los científicos para pasar por el cedazo de la razón el extraño comportamiento de estos electrones sueltos que atravesaban la pantalla?

EL ELECTRÓN ESQUIZOFRÉNICO

Cuando pasaba a través de una de las rendijas, ¿cómo podía saber el electrón si la otra rendija estaba abierta o no? Al fin y al cabo, la otra rendija se hallaba a cierta distancia de la que estaba atravesando. La respuesta no es que el electrón se divide en dos y cada mitad pasa a través de una de las rendijas. Lo extraordinario es que tenemos que renunciar a la idea de que el electrón esté localizado en un punto mientras no sea

observado. Es más acertado describir al electrón mediante una función de onda que proporciona el abanico de sus posibles localizaciones. Éste fue el punto de vista revolucionario que propuso en 1926 el físico austríaco Erwin Schrödinger. La amplitud de onda recoge la probabilidad de que el electrón se encuentre en una determinada zona del espacio cuando es observado.



Una onda cuántica: cuanto más intensa es la onda, más probable es encontrar al electrón en este punto del espacio.

Podríamos preguntarnos: ¿una onda de qué? ¿Qué es lo que está vibrando? De hecho, es una onda de información, más que de materia física. Igual que una ola de delincuencia no es una ola hecha de delincuentes, sino más bien información sobre la probabilidad de que se produzca un delito en un lugar determinado. La onda es simplemente una función matemática, y una función matemática es como una máquina o un ordenador: se introduce información, ella calcula y emite una respuesta. La función de onda del electrón toma como dato de partida una zona del espacio y el dato de salida es la probabilidad de encontrar al electrón en esa zona. Lo sorprendente es que es más correcto imaginar a la partícula no como un ente físico, sino más bien como un concep-

to matemático en acción. Se le llama onda porque las funciones que describen estas probabilidades tienen muchos de los rasgos característicos de las funciones de onda clásicas. Las crestas y los valles codifican la información sobre los puntos en los que puede hallarse el electrón. Cuanto mayor es la amplitud de onda, más probable es encontrar al electrón en esa región del espacio.

En el caso de la onda que describe el comportamiento del electrón, cuando ésta llega a la pantalla con la doble rendija empieza a verse afectada por la interacción con la pantalla. El resultado es una nueva onda cuyos rasgos característicos producen el extraño patrón de interferencias que registré en la placa detectora. En este momento, en el momento de la detección, el electrón tiene que decidir en qué punto de la placa ha de situarse. La función de onda proporciona la probabilidad de los puntos en los que el electrón puede aparecer, pero en el momento de la detección el dado ya ha caído y las probabilidades se convierten en certezas. La onda se esfuma y el electrón se presenta de nuevo como una partícula que choca contra uno de los puntos de la placa detectora. Sin embargo, al repetir el experimento el electrón podría aparecer en otro punto. Cuantos más electrones disparemos sobre la pantalla, a medida que se forma el patrón de los electrones detectados, mejor se va viendo aparecer la estadística codificada en la onda. Pero en cualquier caso individual, la física proclama que es imposible saber de antemano en qué punto de la placa encontraremos al electrón.

Lo curioso es que podemos volver ahora al experimento original que Young realizó con la luz e interpretarlo a la luz (si se me permite la expresión) del descubrimiento de Einstein de que la luz está hecha de partículas llamadas fotones. Si bajamos la intensidad de la fuente de luz en el experimento de Young, llega un punto en el que es tan pequeña que corresponde a lanzar un fotón cada vez contra la pantalla de la doble rendija.

Igual que en el caso del electrón, cuando este fotón llega a la placa fotográfica se manifiesta como un punto determinado correspondiente a su naturaleza como partícula. ¿En qué lugar queda entonces el patrón de interferencia de Young? He aquí la curiosa explicación: si seguimos lanzando fotones uno a uno contra la pantalla de la doble rendija, después de un tiempo irá apareciendo poco a poco el patrón de interferencia sobre la placa fotográfica. Lo que Young vio no era una onda continua que llegaba a la placa: esto era una ilusión. Esta onda está compuesta en realidad de billones y billones de pixeles que corresponden a la detección de la llegada de cada fotón. Para hacerse una idea de cuántos fotones llegan a la placa, una bombilla de 100 vatios emite aproximadamente 10^{20} (cien trillones) de fotones por segundo.

La naturaleza de la luz como onda es la misma que la del electrón. La onda es el concepto matemático que determina la localización probable del fotón de luz al ser detectado. La naturaleza de la luz como onda no corresponde a una onda material de algo que vibra como el agua en una ola, sino a una función de onda que codifica información sobre los puntos en los que el fotón puede aparecer al ser detectado. Como el electrón, hasta el momento de alcanzar la placa fotográfica, aparentemente está pasando a través de ambas rendijas a la vez, y decide solamente su localización definitiva cuando es observada.

Este acto de la observación es el rasgo verdaderamente extraño de la física cuántica. Mientras no le pidamos al detector que nos diga dónde está el electrón, hay que imaginarse que dicha partícula está distribuida probabilísticamente por todo el espacio, con la probabilidad descrita mediante una función matemática que se parece a la que describe una onda. Y el efecto de la doble rendija sobre esta función altera a ésta de tal modo que hace imposible que el electrón aparezca en algunos puntos de la placa detectora. Pero cuando observamos la partícula, el dado cae y la probabilidad ha de elegir la localización de la partícula.

Recuerdo muy bien las Navidades en las que leí por primera vez sobre estas extravagantes historias de cosas que podrían estar en dos sitios distintos a la vez. Acompañando a los juguetes y las golosinas que había dejado junto a la chimenea Santa Claus para mí, había también un libro con un título curioso, *El breviario del señor Tompkins*, escrito por un físico llamado George Gamow. Cuenta la historia de los intentos del señor Tompkins por aprender física asistiendo a las lecciones vespertinas de un profesor eminente, en mitad de las cuales Tompkins no puede remediar el quedarse dormido.

En el mundo de los sueños, el mundo cuántico microscópico de los electrones es aumentado de tamaño hasta formar un mundo macroscópico, y la selva cuántica en la que se encuentra el señor Tompkins está llena de tigres y de monos que se hallan en muchos sitios a la vez. Cuando una partida de tigres de aspecto borroso ataca al señor Tompkins, el profesor que lo acompaña en sueños dispara una ráfaga de balas. Finalmente hay una que alcanza su objetivo y la partida de tigres se convierte súbitamente en un solo tigre «observado».

Recuerdo que quedé fascinado con este mundo fantástico y mucho más entusiasmado al pensar en la posibilidad de que no era tan fantástico como parecía. Estaba empezando a albergar dudas sobre la existencia de Santa Claus, dado que tenía que visitar miles de millones de casas en una misma noche, pero el libro renovó mi fe en la idea. Por supuesto, Santa Claus se estaba aprovechando de la física cuántica. Siempre que nadie lo observara, podía perfectamente estar en muchas chimeneas a la vez.

ANTROPOLOGÍA CUÁNTICA

Para enfatizar el papel peculiar de la observación, si volvemos al experimento de la doble rendija e intentamos escudriñar, colocando un detector en una de las rendijas, por cuál de las dos pasó «realmente» el electrón, el patrón de inter-

ferencias desaparece. El acto de tratar de ver por cuál de las dos rendijas pasa el electrón altera la naturaleza de la función de onda que describe al electrón. Ahora el patrón de la placa detectora mostrará simplemente dos zonas iluminadas alineadas con las dos rendijas: ya no habrá ningún patrón de interferencias. El acto de intentar saber cambia el comportamiento del electrón.

Aunque suene un poco a trampa, una manera de pensar sobre este hecho es imaginar a un antropólogo que observa una tribu amazónica recientemente descubierta. Observarla implica alterar su comportamiento. Es imposible observar sin interactuar de algún modo y sin cambiar el comportamiento de la tribu. Esto es todavía más evidente en el caso del electrón. Para saber por cuál de las rendijas pasó el electrón hay que «mirar», y esto conlleva algún tipo de interacción. Podría ser, por ejemplo, un fotón que rebota sobre el electrón y vuelve hasta el detector. Pero ese fotón debe producir un cambio de momento o de energía, o cambiar la posición del electrón. No puede interactuar sin producir algún cambio. Pero es verdad que esta interacción no tiene por qué ser tan obvia como un rebote del fotón sobre el electrón. Puede ser más sutil. Si nos ponemos a observar si el electrón pasa o no a través de una de las rendijas y no lo detectamos, hemos de inferir que pasó a través de la otra. Pero en este caso ningún fotón ha podido rebotar sobre el electrón. Éste es un modo de medir sin interacciones la localización del electrón.

Hay un experimento mental muy extraño que explota este acto de mirar cómo los electrones pasan a través de las rendijas de la pantalla. Supongamos que se pudiera fabricar una bomba que se activara cuando un electrón suelto choca contra un sensor. El problema es que no tenemos ninguna garantía de que la bomba funciona. En el modelo clásico, la única forma de probarla parece ser el método, bastante absurdo, de lanzar un electrón contra ella. Si explota, sabemos que funciona. Y si no explota, es que era una falsa bomba.

Pero en cualquier caso, después de la prueba nos quedamos sin bomba.

Lo más raro es que podemos usar la idea del experimento de la doble rendija para detectar bombas en uso sin necesidad de hacerlas explotar. Recuérdesse que existen zonas de la placa adonde el electrón no llega cuando realmente pasa por las dos rendijas a la vez. Si detectamos un electrón en ese momento, significa que hemos estado mirándolo y que por lo tanto se ha visto forzado a elegir una de las rendijas. Vamos a usar esa zona como «zona de detección de bombas». Colocamos el sensor de la bomba en una de las rendijas, y si la bomba es una falsa bomba, el sensor no la activará. No hacemos ninguna observación si la bomba es una falsa bomba. Esto significa que el electrón pasa a la vez por ambas rendijas y entonces es imposible que caiga en la «zona de detección de bombas».

Pero ¿qué pasa si no es una falsa bomba? Bueno, el sensor detectará al electrón si pasa por la rendija en la que está y la bomba explotará. Mal asunto entonces. Pero como ahora estaríamos detectando la rendija por la que pasa el electrón, solamente puede colarse por una de ellas y tiene posibilidades de alcanzar la «zona de detección de bombas». Así que si vemos que llega un electrón a la «zona de detección de bombas», significa que la bomba está activa. Una bomba así es un mecanismo detector. La mitad de las veces se detecta un electrón que pasa por la rendija en la que se halla la bomba y ésta explota, pero la otra mitad la bomba detecta que el electrón ha pasado por la otra rendija, el patrón de interferencias no puede formarse, el electrón tiene opción de llegar a la «zona de detección de bombas» y, sin embargo, la bomba no explota. El electrón ha proporcionado información sobre la rendija que ha atravesado, pero el acto de «observación» no ha involucrado el hecho de mirar al electrón, ni golpearlo con un fotón, ni hacer explotar una bomba.

Las extrañas implicaciones del acto de observación pue-

den aplicarse también para detener la desintegración del uranio del pomo que tengo sobre la mesa. Haciendo continuamente muchas miniobservaciones, en un intento de sorprender al uranio en el momento de emitir radiación, las observaciones pueden congelar el uranio y detener su desintegración. Ésta es la versión cuántica del antiguo dicho inglés que asegura que una cazuela vigilada no hierve nunca, pero ahora la cazuela está llena de uranio.

El primero que señaló que el observar continuamente una partícula inestable podría congelarla de algún modo e impedir que evolucionara fue el matemático descifrador de códigos Alan Turing. El fenómeno recibió el nombre de efecto Zenón, en recuerdo del filósofo griego que pensaba que, dado que las instantáneas realizadas a una flecha en el aire no muestran ningún movimiento, la flecha no puede moverse en absoluto.

Imaginemos una partícula que puede estar en dos estados: AQUÍ y ALLÍ. Cuando no se la observa, se halla en una mezcla de los dos, pero la observación la obliga a adoptar uno de los dos. Si decide estar AQUÍ, después de la observación volvería a caer en un estado mixto otra vez, pero si la observamos de nuevo muy rápidamente, estaría todavía muy cerca de estar AQUÍ y probablemente caería de nuevo a estar decididamente AQUÍ. Así que si observamos continuamente a la partícula, nunca va a poder evolucionar lo suficiente como para poder ser detectada ALLÍ. Es como tener dos vasos de agua llenos hasta la mitad, pero cada vez que los observamos tenemos que verter el agua de uno de los vasos en el otro para llenarlo hasta el borde. Después de la observación podríamos empezar de nuevo a llenar el vaso vacío, pero si volvemos a mirar rápidamente, el vaso que estaba vacío no tendrá apenas agua y el otro seguirá casi lleno, con lo cual lo más fácil será llenar de nuevo éste hasta el borde. Mirando rápidamente todo el tiempo, nos aseguramos de que el vaso lleno siga siempre lleno.

Mis hijos están obsesionados con la serie de televisión de ciencia ficción *Doctor Who*. Igual que yo cuando tenía su edad. Los alienígenas que más miedo nos dan son los Ángeles Llorosos, figurillas de piedra parecidas a las que hay en el cementerio de nuestra ciudad y que no se mueven mientras las estás mirando. Pero en cuanto parpadeas pueden moverse. La teoría dice que el pomo de uranio que tengo sobre la mesa es una especie de Ángel Lloroso. Si nos mantenemos vigilando todo el tiempo al uranio, lo cual significa por supuesto algo más que quedarse mirando fijamente al pomo, podemos congelarlo de modo que deje de emitir radiación.

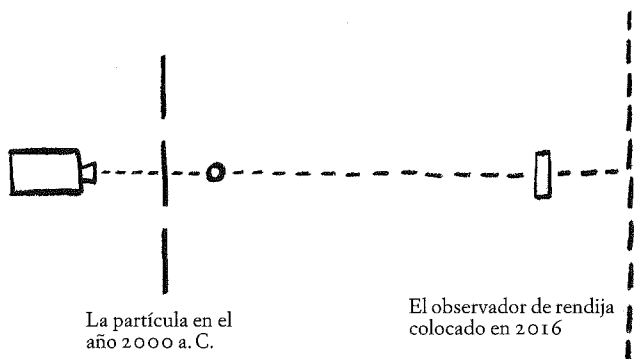
Aunque al principio Turing sugirió la idea como una consecuencia teórica de las matemáticas, resulta que no es solamente una ficción matemática. En la última década se han hecho algunos experimentos que han mostrado la posibilidad real de usar la observación para inhibir la evolución de algunos sistemas cuánticos.

HISTORIAS MÚLTIPLES

La física cuántica parece implicar que hay múltiples futuros para el electrón en el experimento de la doble rendija hasta que lo observamos, y entonces la tirada de un dado cuántico desconocido determina cuál de los posibles futuros se hará realidad. Supongo que puedo adaptarme al hecho de que no conoceré el futuro hasta que no se convierta en presente. Al fin y al cabo, si tomo el dado de casino con la intención de lanzarlo tres veces, entonces hay $6 \times 6 \times 6 = 216$ posibles futuros que el dado puede o no materializar. Mi acto de lanzar el dado selecciona uno de esos 216 futuros posibles, igual que observar al electrón determina una de sus muchas localizaciones posibles. Pero otra variante del experimento de la doble rendija nos lleva a la escalofriante conclusión de que tampoco el pasado está determinado de modo único.

Realmente, parece que es posible alterar el pasado con mis acciones en el presente. Hay un modo de mirar y ver por cuál de las dos rendijas pasó el electrón, mucho después de que éste haya atravesado la pantalla. El instrumento observador puede colocarse un poco antes de que el electrón llegue a la placa detectora. Llamaremos al instrumento observador el «observador de rendija».

Supongamos que ponemos en marcha el experimento de la doble rendija a escala cósmica. Colocamos el emisor de electrones en un extremo del universo y la pantalla con la doble rendija justamente al lado. Situamos la placa detectora en el otro extremo del universo. De esta manera, el electrón tardará años en atravesar el universo y llegar hasta la placa detectora. Así que cuando el electrón pase a través de la pantalla con la doble rendija, no sabrá todavía si lo voy a observar o no con mi «observador de rendija».



La decisión de colocar el «detector de rendija» en la trayectoria de la partícula en 2016 puede alterar lo que hizo la partícula en el año 2000 a. C.

Si, años más tarde, coloco el «observador de rendija», significa que muchos años antes el electrón ha pasado por una rendija o por la otra. Pero si no coloco el «observador de rendija», significa que años antes el electrón ha pasado a la vez

por ambas rendijas. Pero esto es muy raro. Mis acciones a principios del siglo XXI pueden cambiar lo que pasó hace miles de años, cuando el electrón empezó su viaje. Parece que, al igual que hay múltiples futuros, también hay múltiples pasados, y los actos de observación en el presente pueden decidir lo que ocurrió en el pasado. En la misma medida que cuestiona el conocimiento del futuro, la física cuántica plantea también la cuestión de si es posible o no conocer el pasado. Parece que el pasado es también una superposición de posibilidades que cristalizan solamente una vez que son observadas.

UNA PERSONALIDAD ESCINDIDA

Para mí, el punto interesante—que muchas veces pasa completamente desapercibido—es que, hasta el momento de la observación, la física cuántica es completamente determinista. La naturaleza de la ecuación de onda que describe el electrón cuando pasa a través de las rendijas no presenta ningún problema. Cuando descubrió su teoría en 1926, Schrödinger formuló la ecuación diferencial que proporciona esta predicción totalmente determinista de la evolución de la función de onda. En cierto sentido, la ecuación de onda es tan determinista como las ecuaciones del movimiento de Newton.

El carácter probabilístico y la incertidumbre aparecen cuando observamos la partícula e intentamos extraer información clásica. El nuevo rasgo tan poco clásico y tan extravagante es este salto discontinuo que parece darse cuando la onda es «observada». Súbitamente, el determinismo se desvanece y nos quedamos con un electrón localizado aleatoriamente en algún punto del espacio. A la larga la aleatoriedad queda descrita por la información contenida en la función de onda, pero en cada caso individual parece que no hay ningún mecanismo que hayan identificado los científicos que nos permita determinar en ese experimento particular dónde

estará situado el electrón. ¿Es realmente esto lo que pasa? ¿La localización del electrón es algo que nunca podremos de veras predecir antes de hacer la observación?

Una vez hecha la observación o la medición se produce ese extraño salto que coloca a la partícula en unas coordenadas determinadas. Pero inmediatamente después de la observación, la evolución de la partícula vuelve a estar descrita por otra función de onda hasta que se realiza otra medición y se produce el siguiente salto. Schrödinger odiaba estos cambios discontinuos de comportamiento: «Si todos estos endiablados saltos cuánticos han llegado para quedarse, me disgustaría mucho haber tenido algo que ver en el nacimiento de la teoría cuántica».

Tenemos que ser prudentes para no exagerar el papel de los humanos en este asunto. Es posible que los gusanos también sean capaces de colapsar la función de onda. Pero no son solamente criaturas vivientes las que realizan las mediciones. Hay partículas en el otro extremo de un universo potencialmente desprovisto de vida que interactúan con objetos inanimados y que producen el colapso de la función de onda, impidiéndole tomar una decisión sobre las propiedades de la partícula. Esta interacción es un acto de observación, igual que lo es nuestra investigación experimental en el laboratorio. El universo está inundado de radiaciones que arrojan luz sobre todo lo que encuentran. ¿Es ésta la razón por la que el universo en su conjunto parece clásico y no sumido en un estado constante de incertidumbre? Esto está relacionado con una idea que los físicos llaman decoherencia.

La verdad es que tengo serios problemas para asimilar esa idea de que la observación marca una frontera entre un electrón determinista descrito por una función de onda y un electrón que súbitamente adquiere una localización determinada puramente al azar. Todo ello parece absurdo. No obstante, no puede negarse que funciona bien como instrumento computacional. Como al parecer dijo el físico David

Mermin a la gente que, como yo, están descontentos con esta situación: «Cállate y calcula». Es el mismo principio que aplica la teoría de la probabilidad a la tirada de los dados. Los dados pueden controlarse con las ecuaciones de Newton, pero la teoría de la probabilidad es la mejor herramienta que tenemos para calcular el comportamiento de los mismos.

Pero, incluso admitiendo que lo que debo hacer es callarme, no puedo evitar el sentir que las objeciones siguen siendo válidas. El equipo que usamos para hacer las mediciones es un sistema físico compuesto por partículas que obedecen las leyes de la física cuántica al igual que el electrón que tratamos de observar. ¡Incluso yo mismo! Yo no soy más que un manojo de partículas que obedecen las leyes cuánticas. Seguramente también el observador, sea éste una persona o una placa fotográfica, es parte del mundo de la física cuántica y él mismo está descrito por una función de onda. La interacción de la función de onda del electrón y del observador estará también descrita por una función de onda. Al fin y al cabo, ¿en qué consiste una «observación» o una «medición»?

Y si el equipo, el observador y las partículas que pasan a través de las rendijas están descritos por funciones de onda, ¿no es todo determinista? Así desaparece súbitamente el azar. ¿Por qué los físicos se quedan tan satisfechos al afirmar que el acto de observación colapsa la función de onda cuando manifiestamente existe una megafunción de onda en acción que describe todas las partículas, el electrón, el equipo, yo mismo? ¿Dónde colocar la línea divisoria entre el mundo cuántico de la probabilidad y el mundo clásico de las certezas? La visión dual de un mundo microscópico cuántico y un mundo macroscópico clásico parece al menos un poco sospechosa. Seguramente todo el tinglado estará descrito por una función de onda. Esta visión es bastante insatisfactoria en conjunto, pero la verdad es que la mayoría de los físicos acatan el consejo de Mermin y siguen adelante sin más. Mi colega Philip Candelas cuenta la historia de un joven estu-

diente de postgrado muy prometedor, en el que todos habían depositado grandes esperanzas, que un buen día desapareció sin decir palabra. Candelas se puso a indagar hasta averiguar qué le había pasado. ¿Una tragedia familiar? ¿Una enfermedad? ¿Deudas? Nada de eso. «Trató de entender la mecánica cuántica».

Me parece que he olvidado el consejo que ofreció Feynman a aquellos que, como yo, estaban intentando introducirse en el mundo cuántico: «Si pueden evitarlo, no se pregunten constantemente “Pero ¿cómo puede ser así?”, porque es perder el tiempo y meterse en un callejón sin salida del que nadie ha escapado hasta ahora. Nadie sabe cómo puede ser así».

Dicho esto, los físicos han tratado de superar esta incertidumbre aparentemente intrínseca siguiendo varios caminos. Uno de ellos es la hipótesis de que, en el momento de la observación, la realidad se convierte en una superposición de realidades. En cada realidad el fotón o el electrón está localizado en una posición diferente, de modo que la onda no se colapsa, sino que en cierto sentido permanece, describiendo la evolución de todas estas diferentes realidades. Lo único que pasa es que nosotros, como seres conscientes, estamos encadenados ahora a una de las realidades y somos incapaces de acceder a otras en las que el fotón o el electrón acabó en otro punto de la placa fotográfica.

Éste es un intento fascinante de dar un sentido a la física. Se conoce como la interpretación de los «mundos múltiples» y fue propuesta en 1957 por el físico estadounidense Hugh Everett. Lo que a mí me interesa es si alguna vez se podrá saber si esos mundos múltiples están ahí y realmente coexisten con el nuestro. Nadie ha encontrado todavía el modo de sondear esos otros mundos, si es que existen. La teoría postula que hay una sola función de onda que describe la evolución del universo de un modo completamente determinista. Hemos vuelto así a Newton y a Laplace, pero con una ecuación nueva.

El problema es que nosotros, como parte que somos de esa función de onda, no tenemos acceso a otras partes de ella. Nos atrapa dentro y nos confina en una de las ramas de la realidad, y quizá el no poder acceder nunca a esos otros mundos es uno de los rasgos intrínsecos de nuestra experiencia consciente. Pero, aun así, ¿podríamos utilizar las matemáticas para analizar lo que está ocurriendo en las otras ramas? Observamos al electrón en un punto dado de la placa detectora, pero sabemos que la función de onda describe lo que está pasando en todas las demás ramas de la realidad. No podemos verlas, pero al menos podemos describirlas matemáticamente. Por supuesto, igual que el electrón existe en varios mundos, lo mismo ocurre «conmigo»: existen copias mías en las otras ramas que ven cómo el electrón va a parar a otros puntos de la placa detectora.

Este modelo de la realidad es muy intrigante. Parece que incide directamente sobre nuestro concepto de conciencia. Volveré sobre la cuestión de la conciencia en la sexta «frontera», pero en ésta ya se ha planteado la interesante cuestión de si podría estar relacionada con el comportamiento de la función de onda. ¿Por qué somos conscientes solamente de uno de los resultados del encuentro del electrón con la placa detectora? ¿Nuestro conocimiento consciente de lo que pasa en nuestro entorno alcanza solamente a una versión, como la del encuentro del electrón con la placa detectora? ¿Estamos mentalmente mal equipados para procesar los mundos múltiples? Me asomo a la ventana y los fotones que emite la casa de enfrente entran por mis ojos y son detectados por la retina. ¿Por qué no puede ocurrir alguna vez que me asome a la ventana y que vea los números de las casas 14 y 16 intercambiados?

Este intento por reconciliar lo que está pasando implica tratar de explicar que el salto que produce el acto de observar no es real, sino simplemente algo que ocurre en nuestra mente. Percibimos un salto, pero eso no es realmente lo que

está pasando. Este tipo de explicaciones, no obstante, plantean la cuestión de qué es lo que estamos tratando de hacer cuando damos una explicación científica del mundo.

¿Qué es la ciencia? ¿Cómo nos planteamos abordar nuestra interacción con el universo? Solamente conocemos las cosas a través de la observación y de las mediciones. Las ecuaciones matemáticas pueden decirnos qué podemos esperar, pero no sirven para nada mientras no realicemos mediciones. Así que resulta curioso que nuestro único modo de «saber» algo sobre el universo sea observar y hacer que las partículas y la luz se aclaren sobre qué hacen y dónde lo hacen. Antes de eso, ¿todo es fantasía? No podemos medir una función de onda entera, solamente podemos conocerla matemáticamente. Y si en verdad no podemos conocer sin medir, ¿es una función de onda cuántica parte del universo incognoscible? Porque si la medimos se colapsa. Quizá sea demasiado ambicioso pensar que podemos saber más de lo que podemos medir. Hawking ha expresado con mucha claridad esta opinión: «Yo no pido que una teoría se corresponda con la realidad porque yo no sé qué es eso. La realidad no es una cualidad que se pueda verificar con papel tornasol. Todo lo que me interesa es que la teoría prediga los resultados de medidas».

UNA SOLA ENTRADA Y MÚLTIPLES SALIDAS

Mi auténtico problema con la principal interpretación vigente de la física cuántica es que si uno repite el experimento de la doble rendija una segunda vez, exactamente en las mismas condiciones que la primera, los resultados pueden ser diferentes. Esto va en contra de todo aquello en lo que creo. Y es el motivo que me empujó a dedicarme a las matemáticas: la certeza que da una demostración de que existen infinitos números primos significa que la próxima vez que me ocupe del problema no voy a encontrarme súbitamente

con que tan sólo hay un número finito. Yo creía que la ciencia estaba hecha en definitiva de certezas análogas a ésta, incluso en el caso de que fueran inaccesibles para los humanos. Lanzo el dado y reconozco que las matemáticas de la teoría del caos me dicen que quizá nunca sea capaz de calcular el resultado final de la tirada. Pero al menos las matemáticas dicen que si realizamos el lanzamiento dos veces en idénticas condiciones, la cara superior que mostrará el dado después de caer será la misma. Aunque la física que hemos explicado en esta «frontera» cuestiona de manera fundamental si éste es el caso.

La probabilidad en el caso de los dados refleja simplemente una falta de información. En física cuántica el problema no es que el físico tenga solamente una información parcial de la situación. Incluso conociendo todos los detalles, la probabilidad y el azar permanecen. Según la interpretación vigente de la física cuántica, las mismas condiciones iniciales pueden dar lugar a distintos resultados en distintas tiradas de los dados.

Algunos podrían cuestionarse si tiene sentido plantearse la posibilidad de preparar y poner en marcha el experimento en exactamente las mismas condiciones que en una ocasión anterior, o si esto es de hecho imposible. A escala local quizá podríamos conseguir exactamente las mismas condiciones, pero tenemos que incluir el experimento en el universo, y éste ha cambiado. No podemos rebobinar la función de onda del universo y ponerla en marcha otra vez. El universo es un experimento que se realiza una sola vez y que nos incluye a nosotros en su función de onda. Cada observación cambia la función de onda del universo y no hay vuelta atrás.

Pero es que a lo mejor la realidad es aleatoria y no tan determinista como nos gustaría. En sus *Lecciones de física*, Feynman afirma:

En el momento actual debemos limitarnos a calcular probabilidades. Decimos «en el momento actual», pero sospechamos con mucha insistencia que esta limitación nos acompañará siempre, que es imposible resolver el rompecabezas y que así es realmente la naturaleza.

Va a resultar que el auténtico objeto aleatorio que tengo sobre la mesa no es el dado que traje de Las Vegas, sino el pequeño pomo de uranio que compré por internet.

¡Qué desconcertantes son todos estos cambios! ¡Nunca estoy segura de cómo voy a ser, de un minuto a otro!

LEWIS CARROLL, *Alicia en el país de las maravillas*

He de admitir que tengo auténticos problemas con la naturaleza contraintuitiva del mundo cuántico. Aparentemente, es una buena señal. El físico cuántico Niels Bohr declaró en una ocasión: «Si la física cuántica no te ha dejado perplejo, es que no la has entendido todavía».

Richard Feynman dio un paso más y dijo: «Nadie entiende la física cuántica». En una conferencia que ofreció cuando ya había cumplido los sesenta, admitió: «Lo primero que debería decir es que siempre hemos tenido (¡esto es secreto, cerrad las puertas!) muchas dificultades para entender la visión del mundo que representa la mecánica cuántica. Me sigue poniendo nervioso».

El matemático que hay en mí anhela algún mecanismo determinista que me diga cuándo el pomo de uranio emitirá su próxima partícula. Pero el carácter probabilístico de la física cuántica realmente desafía mi capacidad de saber qué es lo próximo que va a ocurrir. Las ecuaciones de Newton ofrecieron la magnífica posibilidad de, una vez conocidos el momento y la posición de una partícula, determinar el comportamiento completo de ésta en el futuro. Y si repetimos el mismo experimento con otra partícula situada en el mismo punto y con el mismo momento, ésta seguirá el mismo camino que siguió la primera.

Pero esta esperanza de que se podría conocer el futuro quedó absolutamente triturada con los descubrimientos que

hizo Heisenberg en 1927. Demostró que el siguiente enunciado no tiene sentido: «Conocemos el momento y la posición de una partícula al mismo tiempo». Parece que existe una relación elástica entre el hecho de conocer la localización de una partícula y el de conocer su momento. Si medimos la posición de una partícula cada vez con mayor precisión, este proceso parece conducir a que el momento admita todo un abanico de posibles valores diferentes. Esto es lo que afirma el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, quizá el mayor desafío al que nos enfrentamos cuando queremos entender los límites de nuestro saber. Como descubriremos, el principio de incertidumbre de Heisenberg explica por qué el uranio que está sobre mi mesa va soltando partículas aleatoriamente.

El propio Heisenberg expresó muy bien lo importante que es estar preparados para replantear nuestra visión del mundo a la vista de los nuevos descubrimientos: «Cuando pasamos de lo conocido a lo desconocido, bien podemos albergar esperanzas de comprender, pero tenemos que aprender al mismo tiempo un nuevo significado de la palabra *comprensión*».

La física cuántica no ha venido a dar respuesta a viejas preguntas, sino a poner en duda las que se nos permite plantear.

ALFOMBRAS CUÁNTICAS

Lo que late en el fondo del descubrimiento de Heisenberg es lo siguiente. Supongamos que tomamos una de las partículas de mi uranio. Si sabemos que la partícula está quieta, resulta que no podemos saber dónde se halla. De hecho, existe la posibilidad de que, al mirar, se encuentre en cualquier punto del universo. Por el contrario, si tratamos de determinar dónde se encuentra exactamente la partícula, de manera súbita perdemos el control de cómo se mueve. Lo que parecía ser una partícula en reposo de repente puede estar moviéndose en cualquier dirección.

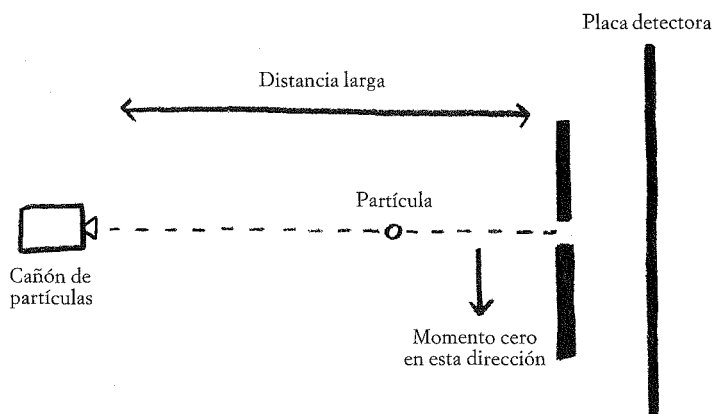
Esto parece totalmente absurdo. Si lanzo los dados al aire y los miro atentamente mientras van camino de la mesa, no se me ocurre pensar que el conocimiento que tengo de la localización de los dados vaya a hacer que éstos salgan volando en otra dirección. Pero esta intuición es válida solamente para cosas con masa relativamente grande. Cuando la masa es tan pequeña como la de un electrón, eso es exactamente lo que puede pasar. Si determinamos la localización de un electrón con un margen de error equivalente al radio de un átomo, su velocidad en cualquier dirección podría variar hasta 1.000 kilómetros por segundo.

Es como tratar de alisar bien una extraña alfombra cuántica: cada vez que estiro el lado de la alfombra donde está la posición, el lado donde está el momento se arruga, y cuando trato de estirar el lado de la alfombra en el que está el momento, se arruga el lado de la posición.

Para hacernos una idea de esta relación elástica entre posición y momento, volvamos a la pantalla con la doble rendija. Hemos estado explorando el extraño comportamiento de una partícula cuando la lanzamos contra una pantalla que tiene dos rendijas. La extraña tensión entre la posición y el momento ha quedado ya al descubierto con el comportamiento de la partícula al pasar por una sola rendija. Ya vimos que al pasar las partículas por una sola rendija se obtenía cierto patrón de dispersión. Pero si pensamos en esto más atentamente, nos preguntaremos: ¿por qué se va a desviar un electrón al pasar por la rendija? Si se trata de una partícula puntual como un electrón, ¿por qué no atraviesa limpiamente la rendija sin sufrir desvío alguno? ¿Cómo se explica la dispersión aparente de las posibles localizaciones al salir de la rendija? Es este tejemaneje entre el conocimiento de la posición y el conocimiento del momento el que explica la dispersión que vemos.

Podemos disponer el experimento de modo que el electrón sea disparado desde una gran distancia, lo que nos ase-

guraré que si pasa por la rendija, la componente de su movimiento en la dirección paralela a la pantalla y perpendicular a la rendija es nula. Esto significa que sabemos que al entrar por la rendija el momento de la partícula en esta dirección es cero. Lo sabemos con precisión.



Si imaginamos que el electrón es una partícula puntual, o pasa limpiamente a través de la rendija, o no pasa. Si pasa, tenemos un conocimiento muy preciso sobre su posición, con un posible error máximo dado por la anchura de la rendija. Estaría claro entonces que podemos prever con exactitud dónde va a chocar con la placa. El momento era cero en la dirección perpendicular a la rendija antes de que electrón entrara por ella, de modo que debería aterrizar en una zona de la placa detectora cuya anchura se correspondiera exactamente con la anchura de la rendija. Entonces, ¿por qué cuando seguimos lanzando electrones sobre la rendija obtenemos el mismo patrón de dispersión que vemos en el caso de ondas que llegan a la placa detectora? ¿Por qué no llegan todos a una zona de la misma anchura que la rendija?

El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que cualquier medición que conlleve la determinación precisa

de la posición del electrón producirá una nueva indeterminación en el valor del momento. Así, por ejemplo, si el electrón ha pasado a través de la rendija, sabemos su posición con un error máximo igual a la anchura de la rendija. Como la anchura de la rendija es pequeña, el margen de error decrece. Pero esto hace que el patrón de dispersión sea cada vez más ancho. ¿Por qué? Porque el valor del momento resulta afectado. Si bien era cero en la dirección perpendicular a la rendija al acercarse a ésta, al salir por el otro lado con su posición bien enfilada, el momento se hace indeterminado. Hemos alisado bien la alfombra cuántica en el lado de la posición y esto ha hecho que se arrugue el lado del momento.

Ésta es una situación muy extraña. Además, no se puede calcular por adelantado de qué modo preciso resultará afectado el momento. Solamente se puede medir posteriormente. Lo único que podemos saber es el abanico de posibles valores esperables para el momento, una vez observado. No sólo esto, sino que si se repite el mismo experimento, el momento no está determinado por las condiciones de aquél. Solamente hay un mecanismo probabilístico para determinar cuál podría ser el momento.

CUANTIFICANDO LA INCERTIDUMBRE

El principio de incertidumbre de Heisenberg no es un enunciado descafeinado, sino que cuantifica la pérdida de conocimiento. Una vez que conocemos la posición del electrón con mucha precisión, su momento como electrón saliente ya no es exactamente cero, pero puede variar estadísticamente en torno al valor medio 0. No sabemos qué valor vamos a obtener si calculamos el momento, ya que éste es indeterminado, pero sí sabemos que estadísticamente las posibilidades del momento estarán distribuidas a ambos lados del valor medio 0. Podemos medir la extensión de esta distribución con un concepto llamado «desviación típica del momento», o Δp .

Ésta es una medida estadística de la extensión de posibilidades. Cuanto más grande es esta extensión, más grande es Δp y más incertidumbre tenemos sobre el valor del momento.

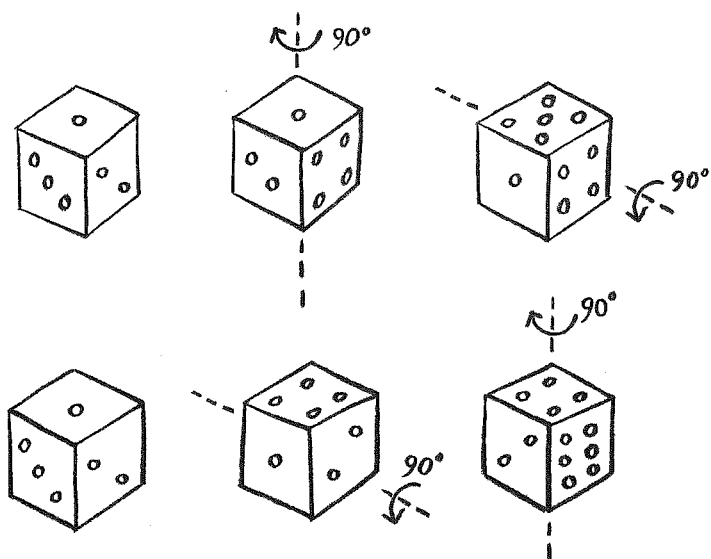
Siguiendo el artículo original de Heisenberg, publicado en 1927, en el que detallaba la extraña relación inversa entre el conocimiento de la posición y el conocimiento del momento, Earle Kennard y posteriormente Howard Robertson dedujeron matemáticamente la compensación entre ambos conocimientos. Si la extensión de posibilidades de la posición tiene una desviación típica de Δx , y la desviación típica de la extensión del momento es Δp , estos dos valores satisfacen la siguiente desigualdad:

$$\Delta x \Delta p \geq h/4\pi$$

donde h es la constante de Planck, el mismo número que vimos al explicar la energía de un fotón de luz. La ecuación dice que si la extensión de posibilidades de la posición media medida por Δx se reduce, a fin de mantener la ecuación correcta se tiene que incrementar la extensión de posibilidades para el momento, medida por Δp . Es una consecuencia matemática de la física cuántica el hecho de que cuanto más conocimiento tenemos de la posible localización de una partícula, más aumenta la posibilidad de que el momento pueda abarcar un abanico más amplio de valores. Esto es exactamente lo que pasa cuando el electrón atraviesa una sola rendija.

La estrecha relación entre estas dos propiedades es una consecuencia del hecho de que tiene importancia el orden en el que hacemos las mediciones. Los actos de medir la posición y el momento están descritos matemáticamente por dos operaciones que dan respuestas diferentes cuando se hacen en distinto orden. La idea puede ilustrarse usando el dado de casino. Supongamos que colocamos el dado sobre la mesa con el 1 en la cara superior, como aparece en la ilustración

de abajo. Si rotamos el dado un cuarto de vuelta en torno al eje vertical que pasa por la cara superior y después un cuarto de vuelta en torno a un eje horizontal que pasa por una de las caras laterales, la cara superior termina mostrando un cinco. Pero si colocamos el dado en su posición original y repetimos los mismos movimientos, pero en el orden contrario, primero en torno al eje horizontal y después en torno al eje vertical, la cara superior acaba mostrando un cuatro.



Cualesquiera mediciones que posean esta propiedad—que al trasladarlas al lenguaje matemático cobren importancia el orden en que se realizan—generarán un principio de incertidumbre. Es sencillamente una consecuencia matemática de la propiedad de la no conmutatividad.

Las matemáticas que subyacen en la física cuántica son muchas veces las causantes de su carácter contraintuitivo. Cuando me zambullí en los libros y artículos que explican la física cuántica, me pareció haber entrado en un laberinto.

Pensé que sabía en qué punto me encontraba antes de emprender el viaje. Después, usando mi experiencia matemática, he ido buscando mi propio camino lógico por los entresijos de este laberinto. He tenido que apoyarme en las matemáticas para guiarme, porque las paredes del laberinto eran demasiado altas y no me permitían intuir el mundo que había detrás. Pero cuando las matemáticas me han llevado hasta el otro extremo del laberinto y he intentado hallar un sentido a ese destino, me he encontrado con que el panorama no se parece en nada al que tenía de partida.

Con las matemáticas me siento satisfecho; lo duro es tratar de interpretar a dónde me han llevado. Es casi como si no dispusiéramos del lenguaje para hacer la traducción inversa y descubrir lo que las matemáticas nos dicen acerca de la realidad. Quizá los problemas que tengo no son nada reales, sino solamente una consecuencia del viejo lenguaje y de las viejas historias. La física cuántica es como una madriguera: una vez que estamos dentro de ella, necesitamos reajustar nuestra visión y formular un nuevo lenguaje para hacernos con este mundo especular. Y para lo bueno y para lo malo, este lenguaje es matemático.

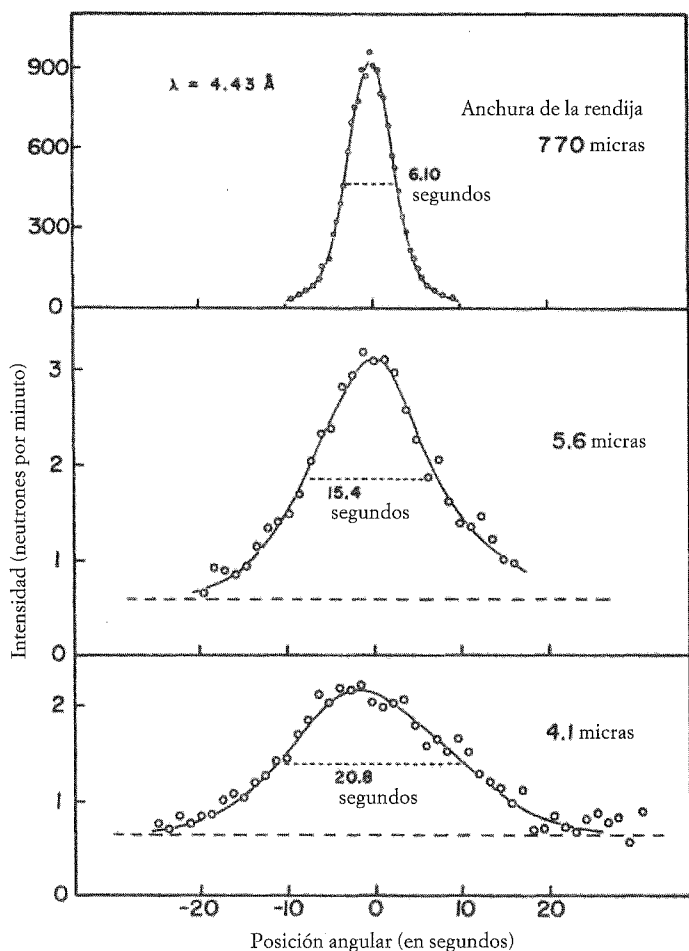
Pero ¿podemos fiarnos de las matemáticas? El funcionamiento del principio de incertidumbre de Heisenberg, predicho teóricamente por las matemáticas, ha sido confirmado experimentalmente. En un artículo publicado en 1969, el físico estadounidense Clifford Shull describe los resultados del bombardeo de neutrones sobre rendijas cada vez más finas. El conocimiento creciente de la localización de los neutrones, dado por el estrechamiento de las rendijas, produjo, como predecía la teoría, una dispersión mayor de los valores posibles del momento. Y cuando los neutrones llegaban a la placa detectora, se dispersaban siguiendo una distribución cuya desviación típica correspondía exactamente a la predicha por la ecuación del principio de incertidumbre de Heisenberg.

El simple acto de conocer mejor la posición del neutrón se ha traducido en un cambio potencial del momento. El principio de incertidumbre de Heisenberg capta en una ecuación el hecho de que nunca podemos saberlo todo. El aumento de lo conocido siempre tiene que compensarse con un aumento correspondiente de lo desconocido.

A medida que ajustamos mejor uno de los valores perdemos precisión en el otro. Pero esta indeterminación puede tener consecuencias insospechadas. Si encerramos a un electrón en una cajita diminuta, sabremos su posición con un alto grado de precisión. Pero eso lleva aparejado el que los posibles valores del momento se extiendan a lo largo de un amplio abanico. Si tratamos de medir el momento, la función de onda colapsa, lo que dará como resultado un amplio elenco de valores diferentes posibles para el mismo.

En cuanto logremos medir el momento, se podría decir que conoceremos tanto la posición como el momento. Pero de hecho esto conduce a que la posición se vuelva indeterminada. Las posibilidades de encontrar al electrón se reparten por todo el universo; tanto es así que existe el llamado efecto túnel cuántico, por el que la partícula que creíamos encerrada dentro de la cajita puede aparecer de repente fuera de ella. Este fenómeno es el responsable de que el uranio que tengo sobre mi mesa emita de vez en cuando una partícula alfa.

Una partícula alfa es parte del núcleo del átomo de uranio, y consiste en dos protones y dos neutrones. El núcleo es como la cajita en la que tenemos encerrada la partícula alfa. En general, las partículas no tienen suficiente energía para escapar de los confines del núcleo. Como la velocidad, y por ende el momento, están ahí confinados, eso significa que el momento se conoce con un alto grado de precisión. Pero por el principio de incertidumbre de Heisenberg, la posición de estas partículas no está claramente definida. De hecho, existe la posibilidad de que su posición se localice fuera del nú-



El experimento de Clifford Shull confirmó que al decrecer la anchura de las rendijas, la dispersión estadística de las localizaciones de los neutrones aumenta.

cleo, en cuyo caso las partículas pueden escapar. Esta incertidumbre en la posición es la responsable de que el uranio pueda emitir radiación.

LOS LÍMITES DEL CONOCIMIENTO EN EL MUNDO DE LO PEQUEÑO

El principio de incertidumbre no solamente explica lo impredecible del comportamiento de mi pomo de uranio, sino que también impone límites a los conocimientos a los que podemos acceder al enfocar nuestra mirada al interior del dado para ver qué pasa.

Si decidimos medir con precisión las coordenadas de uno de los electrones que hay dentro del dado, según logremos reducir el error de las coordenadas, tendremos que pagar con una incertidumbre inevitable en lo que afecta a su momento y, por lo tanto, a su energía. Las ecuaciones de Heisenberg nos dicen la relación matemática que regula este ir y venir. Pero hay un detalle más. Como la masa y la energía están relacionadas por la ecuación de Einstein $E = mc^2$, si la energía es muy alta puede producir el nacimiento espontáneo de nuevas partículas. El problema es que estamos tratando de fijar la localización de una partícula y al hacerlo estamos creando muchas otras partículas, con lo cual se enturbia cualquier intento de investigar la localización de la partícula original. La escala en la cual comienza a incordiar esta complicación se llama longitud de onda de Compton de la partícula. Para un electrón vale aproximadamente 4×10^{-13} metros.

Las cosas empeoran cuando nos acercamos todavía más a la partícula. Llega un punto en el que la incertidumbre es tan grande que la masa correspondiente se hace tan enorme que produce la aparición de un agujero negro. Como veremos en la quinta «frontera», un agujero negro, por su propia naturaleza, parece atrapar toda la información que hay en un radio en torno al centro del agujero y le impide salir de ahí.

Esto significa que el principio de incertidumbre implica la existencia de un límite intrínseco a la hora de sondear los entresijos de la naturaleza. A partir de cierta escala, tenemos vedado el acceso y no podemos ver lo que pasa. Esta escala es muy pequeña. Es del orden de $1,616 \times 10^{-35}$ metros, dis-

tancia conocida como longitud de Planck. Es de una pequeñez ridícula. Si ampliáramos el punto y aparte del final de este párrafo hasta que alcanzara el tamaño del universo conocido, algo del tamaño de la longitud de Planck tendría el aspecto del mismo punto antes de que lo aumentáramos de tamaño.

En la «frontera» anterior llegamos a un punto en el que no podíamos subsubdividir más la materia, y ahora hemos llegado a otro en el que ya no podemos dividir más el espacio. Esto parece una locura. ¿Por qué no vamos a poder, por ejemplo, hablar del punto medio entre dos puntos que estén separados por la distancia de Planck? Matemáticamente tiene pleno sentido, pero parece que no lo tiene físicamente. La física significa que no podemos distinguir entre sí estos dos puntos.

Esto implica que a esa escala el espacio es algo fragmentario, granuloso y discreto, en lugar de continuo como pensaba Newton. Desde esta perspectiva, el espacio es digital, más que analógico. Esto implica a su vez que los objetos fractales de la primera «frontera» no pueden tener ninguna realidad física en la física cuántica. Se supone que un objeto fractal tiene una complejidad infinita en todas las escalas, pero la física cuántica deja de ampliar la imagen una vez que ha llegado a la escala de Planck. ¿Los objetos fractales de la primera «frontera» están solamente en mi mente matemática? La física cuántica y la teoría del caos parecen ser mutuamente incompatibles. Es posible que la física cuántica traiga como consecuencia la supresión de los sistemas caóticos.

Hay que decir que esta impenetrabilidad a partir de la escala de Planck se produce a la sombra de las teorías vigentes. Ésta es la escala en la que la física cuántica y la teoría de la relatividad realmente no funcionan. Tenemos que dar con una nueva teoría, y esto es lo que nos ha llevado a campos como la gravedad cuántica o la teoría de cuerdas. En la teoría de cuerdas, por ejemplo, las partículas ya no son puntos, sino que se imaginan como cuerdas con una longitud igual a la longitud de Planck, formadas por diferentes partículas

que vibran a frecuencias diferentes. ¿Existen reglas válidas en esta escala que nos permitan extraer información en escalas más finas?

OBSERVAR ES CREAR

Ha habido muchos intentos de explicar el principio de incertidumbre como consecuencia del acto de observación, que afecta al sistema. Si queremos ver dónde está una partícula, tenemos que lanzar contra ella un fotón, que tras golpearla le imprimirá un momento desconocido. Pero cuidado con estas explicaciones. Suenan atractivas, pero son engañosas. En la descripción que ofrecimos anteriormente del paso de un electrón a través de una sola rendija, no fue preciso lanzar ningún fotón que alterase el momento. Fue puramente el acto de que el electrón pasase a través de la pantalla el que nos dio información de su localización, que se vio compensada con la pérdida de conocimiento sobre su momento. No hubo ninguna interacción directa con la partícula, que la empujase en una dirección u otra.

Por lo visto, esta descripción engañosa de que los fotones empujan a la partícula proviene del artículo original de Heisenberg. Tuvo que incluirla para convencer a los editores, reacios a sus ideas, de que publicaran el artículo.

El principio de incertidumbre de Heisenberg plantea realmente un reto a la hora de entender qué sentido puede tener decir que un electrón posee una posición y un momento simultáneamente. Debemos evitar enunciar frases como ésta: «Sabemos la posición y el momento de una partícula». No tienen ningún contenido empírico.

El principio de incertidumbre quizá es más que una simple expresión de algo que no podemos saber. Representa más bien un límite en la definición de un concepto. Esto enlaza con la descripción de un electrón por una función de onda que pone en duda si el electrón tiene o no una locali-

zación definida antes de hacer la observación. El enfoque de Heisenberg para este acertijo sobre la naturaleza de la realidad fue el siguiente: «Creo que se puede formular de un modo fructífero la aparición del “camino” clásico de una partícula así: *el “camino” surge sencillamente porque lo observamos*».

Hay una pregunta fundamental sobre lo que realmente nos dice el principio de incertidumbre de Heisenberg: ¿es que nunca podremos saber la localización precisa y el momento de un electrón en cierto instante? ¿O es que no existen estas cosas? No es que no podamos conocerlas, sino que no tiene sentido definirlas para el electrón. Observar es crear.

Durante algún tiempo me ha resultado muy difícil creer que propiedades fundamentales como la posición y el momento se originan solamente al ser medidas. El momento de un electrón podría cambiar al salir éste de la diminuta rendija, pero ¿no ha de tener en todo caso algún valor preciso también antes de que procedamos a medirlo? Puedo aceptar que sea imposible saber lo que es antes de usar el equipo para determinar el momento, pero hay muchas cosas que tampoco conozco antes de ponerme a medirlas. La física cuántica, sin embargo, trata de decirme que esta creencia en la existencia de un valor preciso antes de la medición es un error. Es mi interacción con el equipo la que crea las propiedades de la partícula. ¿Realmente puede ser el acto de medir el que produce la realidad de esta partícula?

Estoy en buena compañía. Einstein, entre otros, trató de desafiar esa idea de que cosas como el momento y la posición sean tan indeterminadas antes de ser observadas. Él argumentó que tienen ciertamente valores explícitos cuando la partícula vuela por el vacío. Quizá no podremos saber lo que son, o disponer de la maquinaria o del tipo de matemáticas necesarias para determinarlas, pero aun así existen, y aun así tienen sentido. El argumento es que no hay que confundir epistemología con ontología. Quizá no sea capaz de

conocer a la vez el momento y la posición (epistemología), pero eso no significa que no existan (ontología).

Renuncié sin embargo a la creencia intuitiva en la existencia de las cosas antes de su medida después de leer sobre el notable teorema propuesto en 1964 por el físico norirlandés John Bell. El teorema de Bell explicó por qué era imposible, para ciertas propiedades de una partícula, existir antes de proceder a medirlas. Si tratamos de que existan antes de la medición, acabamos sumidos en alguna contradicción. Como el sistema no sabe por adelantado qué medición vamos a escoger para empezar, Bell probó que era imposible asignar valores para tener en cuenta cualquier posible medición realizable sin crear resultados que contradigan lo que dictan la teoría y los experimentos. Es como intentar resolver un sudoku que tiene un error. Por mucho que intentemos asignar valores a todas las casillas, siempre obtendremos una fila o una columna con el mismo número dos veces.

Dado que el teorema de Bell está matemáticamente tan bien anclado como el que más, no me queda más remedio que aceptar que el acto de medir parece verdaderamente crear las propiedades de la partícula. Pero todavía tengo muchas sospechas sobre el asunto de si el resultado del acto de medir es tan aleatorio como la teoría actual nos hace creer.

UNA MÁQUINA OCULTA

El teorema de Bell dice que tengo que hacer de tripas corazón y admitir que el dado cuántico no ha sido lanzado hasta que realmente lo miro. La medición es la que motiva que el dado se detenga y decida cómo aterrizar. Pero el resultado ¿es verdaderamente aleatorio, como pretende la física cuántica? Yo sé que el dado de casino realmente no es aleatorio cuando lo examinamos en rigor. Hay un mecanismo físico en acción que es finalmente el responsable de que el dado caiga sobre una u otra cara. Lo que yo siento es que

algo parecido debe de ser cierto para el pomo de uranio y sus radiaciones.

He de admitir que albergo una sensación furtiva que me dicta que la física cuántica es solamente un parche en el camino hacia un entendimiento más completo del comportamiento de las partículas fundamentales. Estoy casi seguro de que, como en los dados, existe algún mecanismo que decide cuándo el pedazo de uranio radiactivo va a expeler una partícula alfa, o que nos dirá en qué punto de la placa detectora aterrizará el electrón después de pasar a través de la doble rendija.

Así pensaba ciertamente Einstein, lo que nos lleva a su célebre cita: «La mecánica cuántica es muy impresionante. Pero una voz interior me dice que aún no es la teoría buena. La teoría aporta mucho, pero no nos aproxima demasiado a los secretos del Viejo. En todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados». Einstein creía que tiene que haber una realidad objetiva detrás de este velo que aparentemente somos incapaces de descorrer. Aunque no podamos tener acceso a ellos, creía que debía de haber engranajes más finos que controlasen los resultados de las mediciones.

De nuevo, estoy de acuerdo con Einstein en este punto. Debe de existir algún mecanismo interno en acción—aunque todavía no lo conozcamos—que interactúa con el instrumento que realiza las mediciones para determinar el resultado. Acepto de buen grado que el mecanismo proceda generando resultados que siguen un modelo aleatorio, igual que pasa a la hora de lanzar los dados. Pero debe de haber algo que determina el resultado. Quizá las partículas que hay dentro del pomo de uranio poseen una especie de relojillo interno, de modo que si el segundero está entre 0 y 30 cuando hago la medición, el uranio emite una radiación, y si está entre 30 y 60, no emite ninguna.

Si poseen en efecto un reloj interno, tiene que ser, como explicaré después, un mecanismo realmente extraordinario,

contraintuitivo. Si existe, este mecanismo parece que debería estar localizado no muy lejos del pomo de uranio. Podría encontrarse en el interior de las partículas que constituyen el uranio, y ser quizá invisible de tan diminuto. A lo mejor no seremos nunca capaces de explorarlo. El problema es que puede darse una situación perturbadora que fue imaginada por primera vez por Einstein y sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen. Resulta que si existe ese mecanismo, parte del mismo puede ser trasladado al otro extremo del universo y no estar ya en ningún punto concreto cerca del uranio que tengo sobre la mesa. Esto puede ser cierto, pero lo sorprendente es que si existe algo así como un reloj secreto que decide cuándo el uranio ha de emitir una partícula alfa, tiene que extenderse por todo el universo.

Esta hipótesis formulada por Einstein, Podolsky y Rosen involucra la idea de entrelazamiento cuántico. Es posible crear dos partículas cuyas propiedades están entrelazadas, en el sentido de que si medimos las propiedades de una de ellas, las respuestas se reflejan forzosamente también en la otra. Es como si tuviéramos dos dados, y cada vez que sale un seis en uno, en el otro también. Sería hartó difícil ensamblar una pareja de dados así entrelazados, precisamente porque el mecanismo que determina cómo cae uno de los dados está controlado por su interacción con el entorno inmediato, y parece imposible ver cómo podría controlar también el comportamiento del otro dado. Sin embargo, en física cuántica es enteramente posible crear estas partículas dependientes y entrelazadas, lo que revela las propiedades tan extrañas que deberá tener cualquier mecanismo oculto que pueda determinar cómo se comportarán al ser medidas.

Para exhibir la extraña naturaleza no local de un mecanismo como éste—si existe—el experimento envía a los dos dados cuánticos entrelazados a extremos opuestos del universo. Si ahora medimos el primero de los dados, éste tiene que decidir qué cara mostrar, y esto determina instantánea-

mente qué cara ha de mostrar el segundo dado en el otro extremo del universo. A algunos, incluido Einstein, les resultó sumamente extraña esta escalofriante acción a distancia. Einstein opinó que podría haber algo que prefijara el resultado de los dados antes de enviarlos a extremos opuestos del universo. Pero esto fue antes de que Bell probara su teorema, que nos dice que es imposible prefijar las propiedades de una partícula cuántica antes de su medición. Recuérdese que medir es crear.

El auténtico reto es comprender cómo la creación de un estado para una partícula en uno de los confines del universo puede crear instantáneamente un nuevo estado para una segunda partícula en el otro confín. Porque si existe algún mecanismo en acción que determina el resultado para la segunda partícula, éste ha sido alterado justamente por algo que ha ocurrido en el otro extremo del universo. No puede localizarse en un punto. El mecanismo no es algo que pueda estar limpiamente confinado en el interior de la partícula.

Einstein ya expresó su inquietud sobre «esta espeluznante acción a distancia» al considerar el experimento de la doble rendija. ¿Cómo sabe la placa detectora que no ha de registrar la llegada del electrón a un cierto punto cuando va a ser detectado en un segundo punto? Parece que se produce un colapso instantáneo de la función de onda que no tiene un efecto cascada desde el punto de vista de la observación a lo largo y ancho de la placa detectora.

En este nuevo caso tenemos dos partículas, pero como se hallan entrelazadas, de algún modo están descritas por una sola función de onda, lo que hace que no sean muy distintas a la partícula detectada en el experimento de la doble rendija. Las dos partículas han de considerarse como una unidad holística. El teorema de Bell significa que las propiedades de las partículas no pueden prefijarse antes de emprender su viaje a los confines del universo, lo que significa a su vez que cualquier mecanismo que determine sus propiedades no puede

estar localizado en la partícula, sino extenderse a todo lo largo y ancho del universo.

Así que si hay un mecanismo que decide cuándo el uranio radiactivo ha de emitir una radiación—que es lo que anhela mi espíritu determinista—, tendrá que ser uno que recorra todo el universo. No puede ser solamente una máquina interna en el ámbito del trozo de uranio de mi mesa, porque esta máquina estaría también controlando en potencia el estado de las partículas que, a lo largo y ancho de todo el universo, puedan estar entrelazadas con el uranio.

Normalmente se echa mano de estos resultados para refutar cualquier intento de sostener que existe un mecanismo en acción que determina cuándo el pomo de uranio emite radiación. Pero realmente estos resultados deberían ser interpretados sólo como las condiciones que debería reunir esa hipotética máquina oculta. Podría haber un mecanismo oculto: lo que ocurre es que sería muy extraño. Como dijo Bell, el responsable de haber descubierto que esas máquinas ocultas deberían ocupar todo el universo: «Lo que prueban las pruebas de imposibilidad es una falta de imaginación».

Pero hay muchos que no están tan ansiosos como yo por eliminar la posibilidad de que el comportamiento del uranio sea aleatorio. La razón es que éste podría ser el resquicio del conocimiento por el que, según una idea que acarician muchos, puede colarse en el marco científico el libre albedrío.

Algunos comentaristas han argumentado que si existe una aleatoriedad genuina en la física cuántica, y el estado de cosas presente no está predeterminado por sucesos pasados, ello prueba que en el universo funciona el libre albedrío. Estas partículas cuánticas parecen ser libres para escoger un camino u otro cuando deciden mostrarse al ser observadas. En el mundo macroscópico, tal vez los humanos no gocemos de libre albedrío, pero parece que estas micropartículas pueden hacer lo que quieran... dentro de un orden.

Quizá el de estas partículas es la expresión de un libre albedrío más amplio. Algunos pensadores religiosos sostienen que la incognoscibilidad conocida de la física cuántica deja margen a un agente externo para actuar sobre el mundo e influir en su destino. Por el momento no disponemos de ningún mecanismo para determinar el resultado de la medición de un sistema que se halle en un estado cuántico de superposición. Siempre que los resultados a largo plazo sean acordes con lo esperable a partir de los resultados aleatorios que vemos, parece haber margen para que un agente determine algunos resultados individuales. Esta idea se beneficiaría de nuestra incapacidad actual para explicar cómo el mundo macroscópico de las mediciones interactúa con el mundo cuántico. Así, en mecánica cuántica, ¿servirá de hogar a un Dios teísta el ámbito de lo desconocido? Si quería llegar a alguna conclusión en mis intentos por entender si era posible que hubiera un Dios oculto en las ecuaciones de la física cuántica, tenía que hablar con alguien que estuviera tan a gusto en el laboratorio como en la catedral. Así que hice una visita a Cambridge.

EL CARNICERO VEGETARIANO

John Polkinghorne estudió física con Paul Dirac en Cambridge y luego con Richard Feynman y Murray Gell-Mann en Caltech. No se pueden pedir mejores maestros. Sus investigaciones, entre otras cosas, han ayudado a confirmar la existencia de los quarks, que son el último eslabón cuando escudriñamos el interior del dado, según piensan muchos.

Polkinghorne está de nuevo en su *alma mater*, y por eso quedé con él en su casa de Cambridge. Al haber disfrutado de una estancia de investigación de cinco años en Cambridge, siempre me gusta aprovechar cualquier ocasión para visitar la ciudad, aunque mi corazón esté con los colores de Oxford. La decisión de Polkinghorne de ordenarse sacerdo-

te, con sus votos, después de estar veinticinco años investigando en la frontera de la física cuántica, lo convierte en un candidato perfecto para indagar en la teología de la incognoscibilidad cuántica. A muchos esto les pareció un cambio drástico en su carrera. Pero él mismo lo explicó:

No dejé la ciencia porque estuviera desilusionado de ella, sino porque sentí que ya había aportado lo que me tocaba después de trabajar en ella durante veinticinco años. Yo me dedicaba sobre todo a la parte matemática, y en este campo probablemente los mejores logros se consiguen antes de cumplir los cuarenta y cinco.

Caramba. Odio que la gente diga eso. Siempre me he afe-
rrado a la esperanza de que es un mito eso de que las matemáticas son solamente para personas de menos de cuarenta años, de que no son un campamento de verano destinado exclusivamente a chicos con edades comprendidas entre los dieciocho y los treinta años. Pero, claro, me doy cuenta también de que, al estar ya en el lado desfavorable de la línea divisoria, qué otra cosa voy a decir. Siempre que queden cuestiones sin respuesta por las que batallar, contaré con un estímulo para seguir adelante. Y tengo todavía muchos de esos problemas sin resolver sobre mi mesa. Pero entiendo muy bien que a uno le guste plantearse nuevos retos... como mis intentos actuales de comprender la física cuántica. Para Polkinghorne el reto fue ordenarse sacerdote, y bromea a menudo sobre el carácter aparentemente contradictorio de los dos oficios a los que ha decidido dedicar su vida.

—La gente piensa a veces que es raro, e incluso hipócrita, ser a la vez físico y sacerdote. Induce en ellos el mismo tipo de perplejidad que podría producirles el oír hablar de un carnicero vegetariano.

Pero él piensa que sus dos papeles conviven en armonía.

—La razón principal es sencillamente que tanto la ciencia como la teología se dedican a la búsqueda de la verdad.

Le pregunté entonces si pensaba que había cuestiones que están fuera del alcance de las dos disciplinas.

—Hay dos tipos de cuestiones que la ciencia no puede resolver. Algunas de ellas surgen de la ciencia misma. El primer tipo proviene de algo que nos ha enseñado la física cuántica: aunque el mundo es metódico, también es confuso y de carácter mudable, y nos está vedado el acceso a ese mundo postnewtoniano claro e incuestionable que podría estar esperándonos.

»Pero también hay cuestiones que por su misma naturaleza quedan fuera de la esfera de aquellas a las que la ciencia puede responder. Creo que la ciencia ha tenido éxitos tremendos y siento un enorme respeto por ella, pero ha cosechado sus logros limitando sus ambiciones. Esencialmente, la ciencia plantea una sola pregunta sobre cómo funcionan las cosas: ¿qué proceso rige el mundo? Y deja deliberadamente de lado, por su propia naturaleza, cuestiones sobre el significado de las cosas, su valor y su propósito.

No es la primera vez que me topo con esta supuesta línea divisoria: la ciencia explica el «cómo» y la religión explica el «por qué». Es un eslogan atractivo, pero creo que tremendamente injusto en lo que se refiere a la ciencia.

La ciencia aborda también multitud de cuestiones que versan sobre el «por qué». ¿Por qué el pomo de uranio emite partículas? ¿Por qué los planetas orbitan alrededor del Sol en un mismo plano, en vez de hacerlo en planos diferentes? ¿Por qué las abejas construyen las celdillas de sus panales en forma de hexágono? ¿Por qué las poblaciones de leminos descienden súbitamente cada cuatro años? ¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué las cosas no pueden viajar a una velocidad superior a la de la luz?

Polkinghorne trató de delimitar para mí la diferencia que ve entre los dos puntos de vista.

—Mi ejemplo favorito de andar por casa es el siguiente. Entramos en la cocina y vemos que la tetera está hirviendo.

Con las gafas de científico, explicaría que la tetera está hirviendo porque la combustión del gas calienta el agua y demás. Pero si me quito las gafas de científico podría decir que la tetera está hirviendo porque me apetecía una taza de té... Por cierto, ¿te apetece una?

Decidí aceptar su invitación. Mientras la infusión reposaba, Polkinghorne continuó:

—No estoy obligado a escoger entre esas dos respuestas, y si quiero entender plenamente el fenómeno de la tetera que hierve, tengo que responder dos preguntas: cómo sucede y por qué sucede.

Convengo con Polkinghorne, hasta cierto punto, en que la ciencia ha limitado sus ambiciones y ha abordado las cuestiones más fáciles. El último teorema de Fermat es francamente más fácil que comprender el comportamiento de mi gato o prever la próxima intervención de Polkinghorne. Pero esto no significa que la ciencia no pueda aspirar en última instancia a comprender las complejidades de un gato o las veleidades de los deseos humanos.

En mi opinión, el debate entre ciencia y religión ha surgido de nuestro terrible deseo de compartimentarlo todo: la mentalidad clasificatoria que dice: «Esto es ciencia y esto es teología y esto es arte y esto es psicología». Lo fantástico es que hemos desarrollado un sinnúmero de discursos que nos ayudan a digerir nuestro entorno. La evolución de todo lo que hay en el universo podría reducirse a las soluciones de la ecuación de onda de Schrödinger, incluida la decisión de Polkinghorne de poner a hervir su tetera, pero si bien es un lenguaje magnífico para describir el comportamiento de mi pomo de uranio, no es el indicado para explicar la migración de una bandada de aves o la emoción que produce escuchar a Mozart, ni para discutir sobre la inmoralidad de la tortura.

Polkinghorne está de acuerdo acerca de los peligros que supone una visión excesivamente reduccionista de la realidad:

—A veces, cuando discuto con amigos firmemente reduccionistas que dicen que la física lo es todo, primero les pregunto: «¿Y qué pasa con las matemáticas?», y después: «¿Qué me decís de la música?». Por supuesto, la música consiste solamente en ciertas vibraciones en el oído, con lo que está dicho todo lo que la ciencia puede afirmar sobre la música, pero evidentemente no todo lo que puede decirse sobre la música. Creo que es muy importante evitar aparecer con una podadora reduccionista y empezar a talar a diestro y siniestro.

Volví a plantear a Polkinghorne su primer ejemplo acerca de las cuestiones que la ciencia no puede responder. ¿Pienso realmente que la física cuántica implica que no podemos saber cuándo el pomo de uranio va a emitir la próxima partícula? ¿Es una cuestión puramente de azar?

—Es muy insatisfactorio que se dé esta especie de lotería. Es como un casino en funcionamiento. La mayoría de los físicos que se han consagrado a los cálculos han acabado acostumbrándose a ello, pero yo creo que es muy insatisfactorio. La cuestión es si se trata de un problema epistémico u ontológico.

»Los problemas epistemológicos tienen respuesta, lo que pasa es que no la conocemos. Pero las cuestiones ontológicas pueden plantear situaciones en las que es imposible conocer. Y ésta es precisamente la interpretación tradicional de la teoría cuántica: no podemos saber.

»Sabemos que el problema del casino es esencialmente epistémico. Hay efectos insignificantes que influyen en los resultados. Yo creo que los problemas de la teoría cuántica son epistémicos, y lo que necesitamos es hacernos una idea del origen de esa frustración epistemológica, de qué es lo que obstruye nuestro camino. Sería importante tratar de arrinconar al máximo los aspectos ontológicos. Y eso todavía no se ha hecho.

La interpretación mayoritaria de los problemas de la física cuántica es que antes de observar una partícula, ésta se en-

cuentra en una superposición de estados descrita por la función de onda, y que la observación mediante aparatos macroscópicos produce un cambio brusco en su comportamiento. La partícula adquiere ahora un estado y la función de onda codifica la probabilidad de que veamos a la partícula en un estado u en otro. No se intenta explicar por qué se produce este salto brusco. Esto es lo que se conoce como la interpretación de Copenhague, llamada así en honor de la ciudad de su principal defensor, el físico danés Niels Bohr. Básicamente es la escuela del «Cállate y calcula» de la física cuántica.

—Aunque me adhiera a la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica, no la encuentro intelectualmente satisfactoria. A la postre, estas cosas se reducen a que llega alguien y dice eso de “sin embargo, ocurre”.

»Es algo producido por los aparatos de medida macroscópicos. Fin de la discusión. Pero esto es ganar por definición. Es un problema. Quedan todavía muchos misterios.

Dado que Polkinghorne cree que hay un Dios actuando sobre el mundo, le pregunté si pensaba que el desconocimiento de esta función de onda que se colapsa era una ventana que le permitía a Dios actuar.

—No creo que Dios esté disponible para decidir si el núcleo de uranio se desintegra o no. Hay alguna especie de mecanismo... no, mecanismo no es la palabra correcta... algún tipo de influencia que regula estas cosas. Una de las paradojas de la teoría cuántica es que llevamos ochenta años con ella y todavía no la entendemos.

En la primera «frontera», al explorar la teoría del caos, vimos que Polkinghorne creía que Dios podría tener algo que ver con los decimales que no podemos conocer. Le pregunté por qué había elegido la teoría del caos, y no la física cuántica, el campo que le era más familiar, para ejemplificar el hueco de lo desconocido a través del cual Dios podría actuar.

—Hubo un período de unos diez años durante los cuales las comunidades científica y teológica intentaron desen-

trañar este tipo de acciones. Por supuesto, no resolvieron el problema, porque hubiera sido un proyecto muy ambicioso. Había un montón de personas, sobre todo en la costa oeste de Estados Unidos, que apostaron a que la teoría cuántica lo explicaría todo. Esto me pareció demasiado simple e ingenuo. Para contrarrestarlo, me volqué, quizá excesivamente, en la dirección contraria. No creo que la teoría del caos proporcione la solución completa. Realmente lo único que sugiere es que el universo físico es sistemático, pero no tan rígidamente como pensaba Newton.

Pero, ciertamente, no desdeña las implicaciones de la física cuántica.

—El descubrimiento de la impredecibilidad intrínseca de la teoría cuántica nos muestra que, en verdad, el mundo no es mecánico y, por lo tanto, que no somos autómatas de un modo trivial e increíble.

Resulta intrigante que un agente que trata de dictar el curso del futuro usando los recovecos de desconocimiento de la mecánica cuántica tenga la oportunidad de actuar solamente cuando se hacen las mediciones. Hasta el momento en el que la medición produce un cambio de fase, las ecuaciones de la física cuántica son totalmente deterministas, y se despliegan de modo lineal y no caótico, sin dejar espacio para actuar a ningún agente. Ésta es una de las razones por las cuales los físicos religiosos como Polkinghorne, que tratan de encontrar un hueco por el que un agente pudiera actuar, no están especialmente encariñados con la incognoscibilidad que implica la física cuántica.

Al volver de Cambridge en mi coche, pienso que esta cuestión de la epistemología contra la ontología parece central para entender lo que la física cuántica puede decirnos sobre lo que no podemos saber. ¿Es como mi dado de casino? Aunque no conozcamos las condiciones iniciales precisas al lanzar el dado, no ponemos en entredicho que existan. No obstante, las cuestiones de la física cuántica ponen en entre-

dicho que podamos decir que el pomo de uranio tiene un estado inicial bien definido.

La interpretación vigente mayoritaria de la física defiende que estamos equivocados si creemos que las partículas del uranio tienen simultáneamente un momento y una posición precisos. Esta interpretación convierte la epistemología en ontología. Nuestra incapacidad de saber es de hecho una expresión de la auténtica naturaleza de las cosas. Como dijo Heisenberg: «Los átomos o las partículas elementales en sí mismas no son reales; forman un mundo de entes potenciales o de meras posibilidades, más que de cosas o de hechos».

CREAR ALGO DE LA NADA

Aunque el principio de incertidumbre de Heisenberg parece crear una incógnita o un hueco a través del cual Dios puede colarse, es posible también que llene otra brecha que para muchos constituye la chispa de la creencia en un Creador. Una de las grandes incógnitas es ésta: ¿por qué existe algo en vez de nada? Mi pomo de uranio llegó por correo, enviado por Amazon y proveniente de la empresa Images Scientific Instruments con sede en Staten Island. Pero si nos seguimos remontando hacia atrás, tratando de encontrar el origen último de este uranio, llegaremos finalmente a toparnos con una incógnita. La necesidad de algún tipo de explicación para esta incógnita está en el centro del concepto de Dios en muchas culturas. Dios es la respuesta a esa pregunta. Pero ¿qué tipo de respuesta es ésta? Quizá solamente subraya el hecho de que muchas personas piensan que no podemos saber la respuesta a esto.

Creo que la mayor parte de los científicos que hablan de un Dios tienen en mente algo que responde a la pregunta aparentemente irresoluble: ¿de dónde viene todo esto? Una vez que el universo está ahí funcionando, se afanan con gusto en dedicar sus cerebros científicos a comprender cómo se

comportan las cosas que tenemos. No están buscando cómo Dios intervendría en el mundo. Esto es lo que comúnmente se llama deísmo, por oposición al teísmo. Este tipo de Dios es en muchos sentidos algo que se puede identificar con «las cosas que no conocemos».

Por supuesto, si tratamos de examinar más de cerca esta respuesta, nos topamos con el problema de la regresión infinita. Si pensamos que hay algo o alguien que es el responsable de la creación del universo, rápidamente caemos en el problema de quién creó ese algo o ese alguien. Por supuesto, ese «quién» es parte sustancial del problema, porque sufrimos una ansiedad terrible por personificar este concepto.

Por eso hay tantos que hablan sobre definiciones trascendentes y cosas que no pueden articularse: para evitar el problema de la regresión infinita. Evitan incluso la prueba de intentar articular qué tipo de respuesta podría haber. Se trata sencillamente de algo que es desconocido y que trasciende nuestros intentos de llegar a conocerlo. Éste es el Dios que el presentador de la BBC de Irlanda del Norte con el que polémicé estaba tratando de describir.

Es un Dios que está definido como algo que no puede articularse. Pero ¿puede tener en este caso algún poder como concepto? Si no puede intervenir, si no puede ejercer ninguna influencia, si no puede ser articulado ni descrito, ¿para qué lo necesitamos? Ésta es la razón por la cual todos los creadores de mitos se han visto obligados a moldear a sus dioses con formas que puedan ser articuladas y reconocidas, y muchas veces incluso personificadas. Un Dios demasiado trascendente pierde su fuerza y se desdibuja. En muchas religiones primitivas esto fue justamente lo que pasó con la idea del Dios Supremo o Dios de los Cielos. Como escribe la experta en religiones Karen Armstrong en su libro *En defensa de Dios*: «Se convirtió en el *Deus otiosus*, una deidad “inútil” o “superflua”, y gradualmente se desvaneció de la conciencia de su pueblo».

Como declaró el teólogo Herbert McCabe: «Afirmar la existencia de Dios es proclamar que existe una pregunta sin respuesta sobre el universo». Pero también advirtió de que el defecto de la religión fue siempre cosificar ese Dios, en lugar de convertirlo en una idea filosófica. El problema, pensaba él, es que la religión cae en la idolatría con demasiada frecuencia, al tratar de relacionarse de manera excesivamente personal con este concepto de Dios.

La dificultad radica en que un concepto indefinido, incognoscible y trascendente es demasiado abstracto y pocos pueden asimilarlo con facilidad. No puede ofrecer el tipo de consuelo que muchos están buscando. Así que quizá es inevitable que su poder dependa de que se convierta en algo menos trascendente, en algo tangible, aunque esto contradiga la definición original y conduzca a la paradoja de «quién creó al creador».

CERO ES IGUAL A UNO MENOS UNO

No obstante, la cuestión de por qué existe algo en vez de nada a lo mejor no es tan inabordable como pensamos. Y es la incógnita de esta tercera «frontera» la que podría proporcionar un modo de conseguir algo *ex nihilo*, algo a partir de nada. Cuando se tiene una porción de espacio vacío, la física cuántica se encargará enseguida de llenarlo con materia. La versión del principio de incertidumbre de Heisenberg que hemos explorado hasta ahora se fija en la relación entre la posición y el momento. Pero hay otros conceptos físicos que están también entrelazados de un modo parecido.

Por ejemplo, el principio de incertidumbre de Heisenberg conecta la medición de tiempo y energía: si observamos lo que ocurre en una porción del espacio aparentemente vacía, al disminuir el período de tiempo durante el cual observamos el espacio, aumenta la incertidumbre de su contenido de energía, lo cual significa que el espacio vacío no puede es-

tar nunca vacío del todo. Durante períodos de tiempo muy cortos existe la posibilidad de que se produzcan fluctuaciones de energía. Como la energía puede transformarse en materia, esto se traduce en que es posible que surjan partículas del vacío espontáneamente. En la mayoría de los casos se anulan unas a otras y vuelven a desaparecer en el vacío, pero a veces algunas sobreviven. Y esto proporciona un mecanismo para crear algo de la nada.

Pero ¿de dónde proviene esta energía? Esta aparición súbita de energía ¿no contradice el principio de conservación de la energía, tan querido por los físicos? Algunos proponen que el contenido total de energía del universo es en realidad cero, y que por lo tanto nadie hace trampas en el sistema. La clave es que la gravedad proporciona energía negativa. De modo que el universo puede surgir de una energía cero—de la nada—porque lo que se crea es una combinación de energía positiva y negativa. Lo que vemos en acción es la ecuación $0 = 1 - 1$. El 0 representa la nada; 1 más -1 es la materia y la gravedad que atrae a la materia.

Podría parecer un poco estrambótico llamar a la gravedad energía negativa, pero imaginemos que colocamos una masa enorme, como un asteroide, cerca de la Tierra: al caer el asteroide sobre la Tierra va ganando energía cinética, pero la atracción gravitatoria también aumenta, porque la gravedad se incrementa cuando las dos masas se acercan. Por lo tanto, para que se conserve la energía, la energía potencial gravitatoria ha de ser negativa y compensar así el incremento de energía cinética.

Según el principio de incertidumbre de Heisenberg, del hecho de que el espacio existe se deduce que hay partículas que surgen de la nada. No es preciso ningún creador. Las fluctuaciones cuánticas significan que estamos todo el tiempo viendo surgir cosas de la nada. Como descubriremos en la quinta «frontera», así es como explicó Hawking el hecho de que los agujeros negros emitan partículas. La nada se trans-

forma en una partícula y una antipartícula, una se queda atrapada en el agujero negro y la otra sale como radiación. Así, la física cuántica proporciona una respuesta parcial a la cuestión de por qué hay algo en vez de nada.

Sin embargo, lo que necesitamos como mínimo es un escenario en el que desarrollar este juego cuántico, lo que plantea a su vez la cuestión de la creación del espacio vacío. De ahí quizá la confusión. Algunos confunden el espacio vacío con la nada. Pero esto es un error. El espacio tridimensional, aunque esté vacío, es sin embargo algo. Es un escenario en el que pueden desplegarse la geometría, las matemáticas y la física. Al fin y al cabo, el hecho de que tengamos un espacio vacío tridimensional en vez de un espacio vacío de cuatro dimensiones apunta ya a la existencia de algo. La nada no tiene dimensión alguna.

En la actualidad, hay teorías que podrían explicar cómo es posible que aparezcan el espacio y el tiempo de la misma manera que las partículas, como fluctuaciones de la gravedad cuántica. Es como si las matemáticas fueran suficientes para explicar cómo, a partir de la introducción de nada, se puede originar algo: un universo. Resulta sorprendente que la ciencia nos diga lo poco que se necesita para poner en marcha las cosas. A la postre, resulta que van a ser las matemáticas, y no Amazon, el origen último de mi pomo de uranio.

CUARTA FRONTERA:

EL UNIVERSO CON RECORTABLES

Yo me atrevo a insinuar esta solución del antiguo problema: *La biblioteca es ilimitada y periódica*. Si un eterno viajero la atravesara en cualquier dirección, comprobaría al cabo de los siglos que los mismos volúmenes se repiten en el mismo desorden (que, repetido, sería un orden: el Orden). Mi soledad se alegra con esa elegante esperanza.

JORGE LUIS BORGES, *La biblioteca de Babel*

Siempre me ha intrigado esta cuestión: ¿existe físicamente el infinito? Mis intentos de llegar al infinito troceando el dado en piezas infinitamente pequeñas quedaron truncados cuando topamos con los quarks indivisibles. Parece incluso que tampoco podemos dividir el espacio infinitamente, porque el espacio está cuantizado. Así que mi búsqueda del infinito se orientará en una nueva dirección: miraré hacia fuera, en vez de hacia dentro.

¿Qué ocurre si nos ponemos a viajar en línea recta? ¿Sigo avanzando siempre? Ésta es una cuestión que tarde o temprano se plantea en algún momento todo el mundo cuando contempla la inmensidad del espacio. Si lanzo el dado a través del vacío espacial, ¿volverá algún día a su punto de partida? ¿Chocará contra un muro cósmico y rebotará? ¿O seguirá volando para siempre? Saber si el universo no se acaba nunca es una cuestión sorprendentemente sutil que se relaciona con el hecho de que el espacio mismo no es algo estático. Incluso en el caso de que el universo sea infinito, a lo mejor hay que limitarse en teoría a la cantidad de espacio que podemos explorar. Puede ser algo que nunca podamos conocer.

Para que me ayude durante mi viaje al infinito, me he descargado de la red el universo: bueno, al menos lo que podemos ver de él. He montado con pegamento un globo celeste de la página web de la Agencia Espacial Europea. No es exactamente un globo. Está compuesto de dos hojas tamaño DIN A4 que he recortado y pegado entre sí para formar una de mis figuras matemáticas preferidas: un icosaedro, cuyas caras son 20 triángulos equiláteros. Como el dado de casino, es uno de los cinco sólidos platónicos que sirven para fabricar buenos dados.

Al mirar el firmamento una noche despejada, parece como si las estrellas estuvieran estampadas sobre un inmenso globo celeste negro que encierra todo el universo. Éste fue ciertamente el modelo del universo para muchas culturas antiguas. Creían que la Tierra descansaba en el centro de este globo, y que alrededor de un eje que pasaba por ella y por la estrella polar—el astro que parece estar fijo en el cielo nocturno—giraban el resto de las estrellas.

Mi globo celeste de papel es un modelo del aspecto que tendría dicha esfera celeste. Lo he colocado sobre mi mesa con la estrella polar apuntando hacia arriba. Rodeando el icosaedro a media altura están los signos del Zodíaco, que marcan el paso del año, y entre ellos figura mi propia constelación, Virgo. El Sol se va moviendo a través de cada una de estas constelaciones, y tarda un año en volver al punto de partida. En la parte inferior del icosaedro se hallan las estrellas que se ven desde el hemisferio sur; la más brillante es Alfa Centauri, que en realidad está constituida por tres estrellas, entre ellas Próxima Centauri, posiblemente la más cercana a nuestra propia estrella, el Sol.

Se han confeccionado versiones de estos globos de papel durante milenios. Cicerón habla de los antiguos astrónomos griegos que fabricaron modelos de este globo celeste con estrellas grabadas, precursores tempranos de mi universo con recortables. Lamentablemente, ninguno de los modelos grie-

gos ha perdurado, así que me metí en el museo de Oxford que más me gusta, el Museo de Historia de la Ciencia, para ver otros que sí que han llegado hasta nosotros. Había un precioso globo de más de medio metro de alto confeccionado en Alemania a principios del siglo XVI. Este globo ilustra vividamente las constelaciones con imágenes de pájaros, peces, otros animales y figuras humanas, impresos en pedazos de papel que luego se han pegado sobre la esfera.

Aunque mi universo con recortables moderno no alcanza la belleza de este globo del siglo XVI del Museo de Historia de la Ciencia, su diseño en forma de icosaedro evoca a Platón y su creencia de que el globo celeste que encierra nuestro universo no puede ser una esfera sino un dodecaedro, otro de los sólidos platónicos que sirven para hacer buenos dados. La importancia de este dado matemático para entender la forma del universo puede que no esté tan desencaminada como parece.

TELESCOPIOS TRIANGULARES

Que podamos saber cosas de regiones del espacio que nunca visitaremos resulta extraordinario. Todas las culturas han observado inevitablemente el cielo nocturno y han contemplado lo que allí aparece. Los objetos más obvios son el Sol y la Luna. Pero ¿cómo demonios pudieron las culturas antiguas descubrir cosas sobre estos entes, estando confinadas en la superficie de la Tierra? Éste es para mí uno de los rasgos más sorprendentes de las matemáticas: que nos permitan deducir cosas sobre el universo sin abandonar la comodidad de nuestros observatorios.

La trigonometría, las matemáticas de los triángulos y los ángulos, fue una herramienta que no se inventó para torturar a los escolares, sino para saber desenvolverse por el cielo nocturno. Es la forma más primitiva del telescopio. Ya en el siglo III a. C. Aristarco de Samos fue capaz de calcular el

tamaño del Sol y de la Luna en función del radio de la Tierra y de determinar su distancia relativa respecto a la Tierra, usando simplemente un triángulo matemático.

Por ejemplo, cuando la Luna está exactamente medio llena, el ángulo entre la Tierra, la Luna y el Sol es esencialmente de 90 grados. Así que al medir el ángulo Φ entre la Luna, la Tierra y el Sol podemos usar la trigonometría para calcular la distancia de la Tierra a la Luna en relación a la distancia de la Tierra al Sol. El cociente de esas dos distancias es precisamente lo que se conoce como el coseno del ángulo Φ , y eso es algo que se puede calcular con un análisis puramente matemático.



Triángulo rectángulo que forman la Tierra, la Luna y el Sol cuando la Luna está medio llena.

La medida más exacta de la distancia relativa, sin embargo, prueba que Aristarco se equivocó en un factor de 20. Había estimado que el ángulo era de 87 grados, mientras que el valor exacto es 89,853 grados, casi un ángulo recto. Pequeñas diferencias en los ángulos producen diferencias muy grandes en el tamaño relativo de las longitudes de los lados del triángulo. Sería precisa la invención del telescopio y de algunos métodos matemáticos más sutiles para determinar el tamaño del sistema solar.

Incluso sin la invención del telescopio, los astrónomos pudieron ver que la Luna y el Sol no eran los únicos cuerpos celestes que se movían por el cielo. Las antiguas culturas loca-

lizaron algunos diminutos puntos de luz en el cielo nocturno que se comportaban de una manera muy diferente a la plétora de las otras estrellas. Eran faros errantes de luz: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, cuerpos luminosos que no es posible grabar en la esfera con recortables porque de una noche a otra pueden pasar a estar localizados en un punto diferente. La importancia del número siete en muchas culturas puede explicarse remitiéndose al hecho de que, con la Luna y el Sol, los planetas visibles son justamente siete.

LIDIANDO CON EL INFINITO

Igual que los planetas se mueven de un día para otro en relación a las estrellas, resulta que las estrellas también se mueven las unas con respecto a las otras. Así que la esfera celeste que tengo sobre la mesa no es más que una instantánea de una noche estrellada en un momento concreto. Sobre mi esfera está grabada la constelación del Carro o del Arado, que es fácil de identificar. Pero las estrellas que forman el Carro—Merak, Dubhe, Alkaid, Phecda, Megrez, Alioth y Mizar—están en movimiento: hace 100.000 años hubieran estado pintadas formando una configuración diferente en mi esfera, y de aquí a 100.000 años presentarán un aspecto diferente otra vez.

Pero para los astrónomos antiguos las estrellas eran fijas, estaban pegadas a la bóveda celeste que engloba el universo. No se discutía mucho sobre lo que podría haber detrás. Era el vacío, la nada. Más allá de los límites de mi modelo de papel había una zona prohibida. Sin embargo, ciertos filósofos medievales sí que estaban preparados para analizar la naturaleza del vacío. Nicolás Oresme pensó que existía el espacio cósmico extra más allá de la bóveda celeste y que tenía una extensión infinita. En sus escritos identificó esta inmensidad con Dios—de un modo no muy distinto, quizá, a

mi propia concepción de Dios como todo aquello que no podemos conocer.

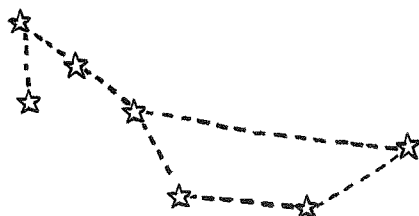
Hace 100.000 años



Hoy



Dentro de 100.000 años



La forma cambiante del Carro.

Oresme no se sintió intimidado por el desafío filosófico del infinito. En realidad, probó que se puede alcanzar el infinito sumando las fracciones $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots$, un resultado matemático contraintuitivo, dado que las fracciones que se suman son cada vez más pequeñas. Esta suma infinita se conoce como la serie armónica, porque cuando pulsamos una cuerda del violonchelo el sonido se produce a base de armónicos cuyas longitudes de onda vienen dadas por todas estas fracciones. Como explicaré más tarde, la revelación de que esta serie suma infinito tiene repercusiones interesantes al

examinar el problema de hasta dónde puede alcanzar nuestra vista en el espacio.

Parece que hasta el siglo V los astrónomos no empezaron a plantearse la idea de que la bóveda celeste podría ser una ilusión, y que el universo podría extenderse hasta el infinito. Nicolás de Cusa sugirió que el universo era infinito y por tanto que cualquier punto podía ser considerado su centro. La idea fue recogida por el monje dominico italiano Giordano Bruno, que en 1584 escribió una obra muy original, *Del infinito, el universo y los mundos*: «El universo es entonces uno, infinito, inmóvil [...] No es capaz de comprensión y por lo tanto no tiene fin ni límites, siendo entonces infinito e indeterminable, y por lo tanto inmóvil».

La lógica de Bruno que conduce a esta conclusión es interesante. El universo es creado por Dios, pero Dios es incognoscible. Por lo tanto, el universo debe estar fuera de nuestra comprensión. Así pues, ha de ser infinito, ya que un universo finito es en teoría cognoscible. Ahora bien, yo diría que lo contrario es también cierto: si el universo es infinito, esto significa que está potencialmente fuera del alcance de nuestra comprensión. Y si estamos explorando el concepto de Dios como una manera de articular las cosas que no podemos conocer, entonces un universo infinito, si no es cognoscible, podría implicar la existencia de este concepto de trascendencia. Pero ¿es el universo infinito y, si es así, resulta tan imposible de conocer como puede parecer a primera vista?

Bruno ofrece más ideas, aparte de su creencia en Dios, para justificar su visión de un universo infinito. Uno de los desafíos más poderosos que plantea el concepto de un universo finito contenido en una esfera celeste es la cuestión de qué hay entonces detrás del muro que encierra el universo. Muchos propusieron que no hay nada: el vacío. Pero a Bruno no le convencía. También pensaba que el tiempo era infinito tanto hacia atrás como hacia delante. Esto de algún modo evitaba la necesidad del momento de la creación y también

del día del juicio final, y era por lo tanto controvertido. A Bruno no le amedrentaban las controversias, y sus interpretaciones de la Biblia le condujeron a un choque con la Iglesia católica, algo nada bueno en aquellos tiempos. Fue quemado en la hoguera el 17 de febrero de 1600.

Las ideas de Bruno plantean la cuestión de cómo podríamos saber alguna vez si el universo es infinito. Si es finito, a lo mejor podría ser posible saberlo. La superficie de la Tierra resultó ser finita y circunnavegable, así que quizá podríamos simplemente rodear el universo navegando y probar así que es finito. Aunque no tengamos un barco con el que podamos navegar hasta los confines del universo, los científicos del siglo XVII dieron con un medio ingenioso para explorar el espacio: el telescopio.

¿HASTA DÓNDE PODEMOS VER?

La generación de Galileo fue la que descubrió que se podía aumentar la distancia a la que es posible ver bien colocando lentes de cristal tallado en un tubo. De hecho, durante años se pensó que Galileo mismo merecía el título de inventor del telescopio, pero esta distinción debería corresponder al constructor de lentes neerlandés Hans Lippershey, que patentó un instrumento «para ver las cosas lejanas como si estuvieran cerca». Este instrumento neerlandés tenía una capacidad de aumentar las imágenes por 3.

Galileo oyó hablar del instrumento durante un viaje a Venecia. Esa misma noche descubrió el principio en que se basaba el aparato y pronto empezó a construir otros que conseguían aumentar 33 veces las imágenes. El nombre «telescopio» fue acuñado por un poeta griego que participaba en un banquete en honor de Galileo en 1611: en griego, *tele* significa 'lejos' y *skopein* 'ver'. Y sirvió realmente para que Galileo y las generaciones posteriores de astrónomos pudieran ver mucho más lejos que antes. Galileo descubrió las lunas que

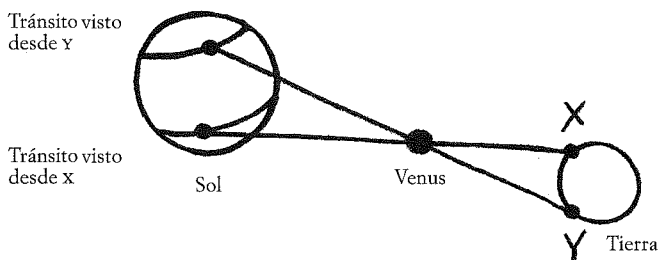
orbitan en torno a Júpiter y manchas solares que rotaban, lo cual implicaba que el Sol giraba sobre su eje, fenómenos que ayudaron a confirmar el modelo de Copérnico de un sistema solar centrado en el Sol.

En 1663 el matemático escocés James Gregory advirtió que el telescopio podría también usarse para realizar nuevos cálculos a fin de determinar la distancia entre la Tierra y el Sol. Johannes Kepler ya había observado el tiempo que tardan los distintos planetas en orbitar alrededor del Sol y había deducido, usando sus leyes del movimiento planetario, la distancia relativa entre cada planeta y el Sol. Su tercera ley afirma que el cuadrado del tiempo que tarda un planeta en completar una órbita alrededor del Sol es proporcional al cubo de su distancia al mismo. Por ejemplo, Venus completa una órbita en $3/5$ del tiempo que tarda la Tierra en hacerlo mismo, lo cual significa que la distancia de Venus al Sol es más o menos $7/10$ —aproximadamente $(3/5)^{2/3}$ —de la distancia de la Tierra al Sol. (Cuando hablo de la distancia al Sol hay que ser cuidadosos, puesto que, como ya descubrió Kepler, los planetas no describen circunferencias perfectas sino elipses, de modo que la distancia varía. En general, con distancia me refiero a algo así como la distancia media).

Pero éstas son simplemente distancias relativas. Lo que Gregory y otros advirtieron es que podían usar observaciones del tránsito de Venus sobre el Sol y una pizca de trigonometría para calcular las distancias reales entre la Tierra y el Sol y entre Venus y el Sol. Si hacían observaciones desde dos localizaciones terrestres diferentes de los diferentes puntos y momentos en los que Venus atravesaba el Sol, podrían determinar el ángulo del triángulo formado por los dos observadores y Venus. Y de aquí, calculando la distancia entre los dos observadores en la Tierra y usando un poco de trigonometría, podrían deducir la distancia a Venus.

El truco en el que se basa la trigonometría es usar triángulos para trasladar algo que no puede medirse directamente,

como la distancia entre Venus y la Tierra, a algo que podamos medir desde la superficie de la Tierra, como el ángulo o la distancia entre dos puntos de la Tierra. El cálculo fue una aplicación complicada pero inteligente del pensamiento matemático abstracto, combinada con las observaciones astronómicas prácticas.



El tránsito de Venus desde dos puntos diferentes de la Tierra.

El problema es que estos tránsitos no ocurren con tanta frecuencia. Venus ha cruzado el Sol solamente 10 veces desde el año 1400. Gregory propuso originalmente usar el tránsito de Mercurio, ya que el próximo tránsito de Venus no iba a ocurrir hasta 1761. Edmond Halley conoció su trabajo e hizo observaciones del tránsito de Mercurio en 1676, pero se supo que solamente se hicieron dos observaciones, que son suficientes teóricamente para calcular la distancia, pero dado que pueden producirse errores, lo más deseable es disponer del máximo número de observaciones posible.

Las múltiples observaciones de los tránsitos de Venus en 1761 y en 1769 fueron las que permitieron finalmente hacer los cálculos que determinaron la distancia entre la Tierra y el Sol. En uno de los primeros experimentos científicos globales de este tipo, se calculó que la Tierra se encuentra a 152 millones de kilómetros del Sol. La pena fue que Halley murió unos diecinueve años antes y se perdió la culminación del proyecto que había tratado de realizar noventa años atrás. Hoy día

los cálculos dan una distancia media entre la Tierra y el Sol de 149.597.870,7 kilómetros.

Éste fue un primer atisbo de la inmensidad recogida en mi globo celeste de papel. Los astrónomos de la Antigüedad pensaron que este modelo de papel contenía globos más pequeños sobre los que estaban pegados los planetas. Si estuvieran en lo cierto, estos globos deberían tener millones de kilómetros de diámetro.

Yo me sigo quedando boquiabierto por el poder de la trigonometría para trasladar una medida hecha en la Tierra a una medida de la distancia a un planeta que ningún ser humano ha visitado jamás. A ésta iban a seguirle hazañas matemáticas todavía más impresionantes. Los telescopios y la luz no son los únicos medios que tenemos de saber lo que hay ahí. Resultó que las matemáticas también podían ofrecer visiones del universo a larga distancia; tanto fue así que consiguieron predecir la existencia de un nuevo planeta antes de que fuera visto a través del tubo de un telescopio.

CÓMO DESCUBRIR UN PLANETA CON LA PUNTA DE LA PLUMA

Hay dos modos de detectar un nuevo planeta: suerte y lógica. El primer planeta que se detectó después de la Antigüedad se descubrió por casualidad. El músico alemán Friedrich Wilhelm Herschel se había trasladado de Hannover a Inglaterra con la idea de progresar en su carrera musical. Pero también era una especie de astrónomo aficionado y dedicaba las noches a mirar el cielo con su impresionante colección de telescopios.

El 13 de marzo de 1781 Herschel detectó algo inusual. Lo que al principio tomó por una estrella parecía cambiar de tamaño según el aumento del telescopio con que la mirara. Esto era generalmente una indicación de algo que estaba relativamente cerca. La siguiente prueba consistía en compro-

bar si se movía. Como era de prever, cuando la miró cuatro días más tarde había cambiado su posición relativa con respecto a las otras estrellas. Dada la cantidad de cometas que se habían detectado, su primera idea fue que no se trataba de un nuevo planeta.

Pero después de avisar al astrónomo real y seguirle un poco más la pista a este objeto, quedó claro que su órbita no era parabólica, como suele ser el caso en un cometa, sino casi circular. El objeto era también demasiado brillante para ser un cometa y no había ninguna cola visible. Los astrónomos concluyeron que en realidad se trataba de un nuevo planeta. Herschel quiso bautizarlo como el rey Jorge III, pero prevaleció la mitología clásica. Saturno fue el padre de Júpiter, y este nuevo planeta que orbitaba más lejos aún adoptó el nombre del padre de Saturno: Urano.

Los astrónomos estaban entusiasmados con la idea de un nuevo planeta y empezaron a trazar su trayectoria, a buscar sus lunas y a calcular la longitud de su órbita alrededor del Sol. Pero Urano no se comportaba tan bien como los astrónomos habían esperado. La teoría de la gravitación de Newton, que tan exitosa había resultado a la hora de predecir las trayectorias de los otros planetas, fallaba estrepitosamente cuando tocaba predecir dónde aparecería Urano. Hacia 1788 el planeta estaba desplazado $1/120$ de grado respecto al punto en el que debería estar. Se pensó que habría que revisar el efecto gravitatorio de Júpiter y Saturno.

En 1791 se publicó una nueva trayectoria, pero hacia 1800 se había salido de ella otra vez. En 1825 se había adelantado a su posición pronosticada, pero luego empezó a ralentizarse y en 1832 se había quedado rezagado respecto del punto en el que habría de estar según las matemáticas. ¿Habría alguna sustancia misteriosa que producía esta resistencia? ¿Fallarían las leyes de Newton a estas distancias tan grandes del Sol? Algunos sugirieron que, igual que Júpiter y Saturno ejercían un empuje gravitatorio sobre Urano, quizá había por

ahí otro planeta que movía a Urano de sitio. Pero, si existía, ¿dónde estaba?

Mientras que Urano fue descubierto por azar, este nuevo planeta sería localizado usando la fuerza de la lógica, encarnada en las matemáticas de Newton. Hasta ese momento, los astrónomos habían partido de la localización de los planetas y con las matemáticas habían calculado sus órbitas. Ahora debían revertir el proceso. Se había seguido la trayectoria de Urano durante algunas décadas, y ahora el reto era descubrir dónde habría que colocar un planeta que explicara la extraña trayectoria de Urano.

La tarea era abrumadora desde el punto de vista matemático, pero hubo dos teóricos que recogieron el guante: John Couch Adams en Inglaterra y Urbain Leverrier en Francia. Ambos consiguieron invertir el problema e identificar dónde podría estar el nuevo planeta. Adams había completado sus cálculos en septiembre de 1845 y se puso en contacto con astrónomos de Inglaterra para tratar de localizar dicho planeta. Parece ser que la falta de credenciales de Adams y su carácter huraño, vinculado quizá a un síndrome de Asperger, hizo que no congeniara mucho con las autoridades. El astrónomo real estaba entonces bastante absorbido por un caso escandaloso de asesinato en el que se hallaba involucrado uno de sus ayudantes. Esto supuso que las predicciones de Adams cayeran en el olvido en la orilla inglesa del Canal. Leverrier estuvo trabajando hasta junio de 1846 para terminar sus cálculos, y tuvo problemas parecidos para conseguir que las autoridades astronómicas francesas invirtieran su precioso tiempo de telescopio en la búsqueda de un planeta hipotético. Así que Leverrier escribió al observatorio de Berlín en solicitud de ayuda.

Los astrónomos alemanes fueron más proclives a colaborar. El 23 de septiembre de 1846, Johann Gottfried Galle apuntó con su telescopio Fraunhofer a la posición del cielo nocturno en la que situaban el nuevo planeta los cálculos de

Leverrier. Efectivamente, había un punto de luz que no aparecía en ninguno de los mapas celestes que tenían en el observatorio. La noche siguiente se había movido... exactamente la distancia prevista en los cálculos de Leverrier.

El anuncio de un nuevo planeta fue saludado con gran entusiasmo por muchos, pero los astrónomos de Inglaterra que habían hecho caso omiso a las predicciones de Adams quedaron en ridículo. Herschel, que ahora pertenecía al Consejo Asesor del Real Observatorio, intentó establecer los hechos de modo que quedara claro que Adams había sido el primero en hacer la predicción. Esto condujo inevitablemente a una agria disputa sobre la prioridad en el descubrimiento. El nombre del planeta se convirtió en un partido de fútbol político, con los franceses queriendo llamarle Leverrier y los ingleses objetando que eso rompía la tradición de llamar a los planetas con nombres de dioses romanos. Finalmente la comunidad internacional zanjó el asunto poniéndole el nombre de Neptuno.

El poder de las matemáticas para decirnos lo que puede haber allá lejos es harto notable. Como observó con ironía el astrónomo François Arago, Leverrier había descubierto Neptuno «con la punta de su pluma». Aunque, por supuesto, precisó las observaciones de Galle en el Observatorio de Berlín para confirmar su teoría.

Sin movernos de la superficie de la Tierra, hemos sido capaces sin embargo de navegar hasta los confines del sistema solar. ¿Hasta dónde más podríamos explorar? Aunque el telescopio nos había permitido viajar hasta muy lejos, también iba a revelar los límites teóricos de hasta dónde seríamos capaces de ver, porque resulta que la luz tarda un tiempo en llegar hasta nosotros.

EL LÍMITE CÓSMICO DE LA VELOCIDAD

El telescopio fue fundamental para zanjar una cuestión sobre la que se venía disputando desde la Antigüedad. La luz

¿manifiesta instantáneamente su presencia en el espacio o tarda tiempo en viajar de un punto a otro? Aristóteles, por ejemplo, no creía que la luz se moviera. Estaba presente o no. Hubo quienes le dieron la razón. Los antiguos griegos pensaban que la visión implicaba que la luz viajaba desde el ojo hasta el objeto. Si esto era así, razonaba el matemático Herón de Alejandría, la luz tendría que ser instantánea. De otro modo, cuando abrimos los ojos, ¿cómo podríamos ver inmediatamente las estrellas lejanas?

Fue el erudito musulmán Alhacén el que sugirió en su libro de óptica que la luz viaja en sentido contrario: del objeto al ojo. Pero, aunque realmente viajara en el otro sentido, muchos seguían creyendo que lo haría a una velocidad infinita. Galileo, no obstante, no estaba seguro. Pensaba que si la luz tarda un tiempo en viajar desde su fuente, sin duda podríamos calcularlo. Propuso descubrir un foco de luz y comprobar cuánto tiempo tarda en ser detectado a unos cuantos kilómetros de distancia. La escala que proponía Galileo era demasiado pequeña como para poder detectar el más mínimo retraso, y fue Descartes el que la amplió. Se dio cuenta de que si la luz tarda un tiempo en llegar a la Tierra desde el Sol y la Luna, la duración de los eclipses lunares estaría ligeramente desplazada con respecto a lo que esperamos. Pero nunca se detectó ese desplazamiento. Tanto Galileo como Descartes toparon con el mismo inconveniente: sencillamente, la luz viaja a una velocidad tan rápida que la Luna y el Sol siguen estando demasiado cerca como para poder detectar alguna discrepancia.

No fue la luna de la Tierra sino las lunas de Júpiter las que finalmente proporcionaron la prueba de que la luz tarda tiempo en cruzar el espacio. Galileo había propuesto que las lunas de Júpiter podrían usarse como un modo astuto de resolver el problema de la longitud. Esto conllevaría medir el tiempo usando el momento en el que la luna más cercana, Io, entra en la sombra creada por Júpiter. Io tarda 42,5 horas en

orbitar en torno a Júpiter, con una regularidad suficiente como para poder ser usada como reloj cósmico. Si se confeccionara una tabla con las horas en las que se produce este eclipse en Florencia, entonces observando la hora del eclipse en otro lugar, podríamos deducir nuestra longitud en relación a Florencia. Esto realmente no prosperó como método para determinar la longitud en el mar, el gran desafío en aquel momento, pero fue utilizado para determinar la longitud en tierra.

En 1676, el astrónomo danés Ole Rømer usó las lunas de Júpiter para descubrir la velocidad finita de la luz. Mientras trabajaba en el observatorio de París, registró las horas a las que la luna Io desaparecía tras la sombra de Júpiter. Los horarios parecían depender de dónde estaba la Tierra en su órbita alrededor del Sol. Si la Tierra y Júpiter se hallaban en lados opuestos del Sol, parecía producirse un retraso. Rømer se dio cuenta de que esto era así porque en ese caso la luz tardaba más en viajar hasta la Tierra que si ésta estuviera en el mismo lado del Sol que Júpiter. El descubrimiento fue anunciado el 22 de agosto de 1676 en la Real Academia de Ciencias de París por Giovanni Cassini, el director del observatorio de la ciudad. Explicó que los astrónomos tendrían que cambiar las tablas que predecían las horas a las que Io desaparecería: «Esto parece que se debe a que la luz tarda un tiempo en llegar hasta nosotros desde el satélite; la luz parece tardar entre 10 y 11 minutos en recorrer una distancia igual a la mitad del diámetro de la órbita terrestre».

Las medidas actuales dicen que tarda 8 minutos y 20 segundos, de modo que los astrónomos del siglo XVII no iban tan descaminados. A esto siguieron toda una serie de experimentos para determinar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío. Dado que esta velocidad es del orden de 300.000 kilómetros por segundo, no es extraño que muchos pensaran que era infinita. Ahora que el telescopio permitía medir enormes distancias en el espacio, la velocidad de la luz

se convertiría en un límite importante a la hora de intentar ver lo que pasa en los confines del universo.

En realidad, si miramos el universo, el hecho de que la luz tarda un tiempo en cruzar el espacio implica que realmente estamos mirando el pasado. Una instantánea del cielo describe el Sol tal como era hace 8 minutos y 20 segundos, la estrella más cercana tal como era hace cuatro años y las galaxias más distantes tal como eran hace miles de millones de años. Es posible que en alguna galaxia lejana, los telescopios que apuntan a la Tierra estén viendo ahora la extinción de los dinosaurios, que se produjo hace 66 millones de años.

La velocidad de la luz se convirtió para los astrónomos en parte de la manera de medir la inmensidad del espacio. Cuando los astrónomos dicen que algo está a un año luz, lo que quieren decir es que la luz tardaría un año en llegar desde ese punto hasta nosotros.

LAS ESTRELLAS DE NUESTRO ENTORNO

Mirando la esfera celeste que tengo sobre la mesa, me parece gracioso que los antiguos griegos pensaran que las estrellas estaban pintadas en una bola celeste gigantesca que encerraba el universo, con el vacío detrás. Pero no tenían muchos recursos para avanzar más. Dada la distancia que hay entre la Tierra y las estrellas, a simple vista todas parecen estar inmensamente lejos. Para los antiguos astrónomos era imposible detectar algún tipo de profundidad. Pero la invención del telescopio acercó un poco a esas estrellas, lo suficiente para que los astrónomos modernos pudieran ver que no todas están a la misma distancia de la Tierra.

Hay una manera de ver si una estrella se halla más cerca de nosotros que otra. Aunque estamos confinados en la superficie de la Tierra, al menos ésta se mueve en relación a las estrellas, lo que significa que podemos ir viendo diferentes versiones del cosmos. Aquí teníamos una oportunidad para

empezar a despegar alguna de las estrellas del globo celeste y añadir así algo de profundidad al universo.

Si colocamos un dedo enfrente de nuestros ojos, miramos por la ventana y giramos la cabeza de un lado a otro, veremos que las cosas que están cerca, como el dedo, se desplazan más que las cosas que están lejos. Este efecto se llama paralaje. Los astrónomos pueden hacer lo mismo cuando observan las estrellas. Si comparan la localización de las estrellas en verano con su posición en invierno, esto les dirá qué estrellas se hallan más cerca de la Tierra.

Herschel estaba de hecho intentando detectar este paralaje estelar—como se denomina el paralaje a escala interestelar—, cuando se topó con el nuevo planeta Urano. La diferencia de localizaciones de una estrella dada es minúscula, y se necesitan telescopios con una precisión suficiente para detectar el desplazamiento. Las siguientes medidas fiables son de la década de 1830, cuando el astrónomo y matemático alemán Friedrich Bessel registró las primeras observaciones precisas de paralaje estelar. Para aplicar la técnica a las estrellas cercanas, los astrónomos tuvieron que suponer que las estrellas lejanas estaban esencialmente pegadas a un único muro celeste que encierra el universo, como en el modelo griego. La clave es que cuando se tiene el propósito de detectar el paralaje de las estrellas cercanas, las estrellas más lejanas parecen fijas y pueden usarse como fondo para detectar el movimiento aparente de las estrellas cercanas.

Bessel comparó las localizaciones de una estrella llamada 61 Cygni en verano y en invierno, y trazando el triángulo formado por la estrella con los dos puntos de la órbita terrestre, calculó uno de los ángulos de éste. Con ello, aplicando el conocimiento de la distancia de la Tierra al Sol y la trigonometría, los astrónomos lograron las primeras estimaciones de la distancia a la que estaban las estrellas más próximas a la Tierra. Los cálculos de Bessel sugerían que 61 Cygni se hallaba a una distancia equivalente a 660.000 veces la que media entre

la Tierra y el Sol. Su cálculo tenía un 10 % de error. El valor actual de esta distancia es de 721.000 veces la distancia de la Tierra al Sol, o 11,41 años luz. Pero Bessel se aproximó mucho a la distancia correcta y nos dio así la primera impresión de la profundidad del espacio.

Cálculos posteriores localizaron otras estrellas que se hallaban todavía más cerca. La estrella conocida más cercana a nosotros no fue localizada hasta 1915 por el astrónomo escocés Robert Innes. Próxima Centauri es demasiado débil como para verse a simple vista, y por eso se tardó tanto en descubrirla, pero los cálculos de paralaje la sitúan a una distancia equivalente a 268.326 veces la de la Tierra al Sol, o 4,24 años luz.

El método del paralaje estelar empezó a despegar algunas estrellas de mi esfera celeste y a acercarlas a la Tierra. Siempre que una estrella no se halle a más de 400 años luz de nosotros, este método funciona. Pero la mayoría de las estrellas siguen pareciendo tan lejanas que tanto daría pensar que están pegadas en el modelo de papel. El análisis de la longitud de onda de la luz que proviene de esas estrellas nos permitió dar el paso siguiente en nuestro camino hacia los límites del universo.

«ESTRELLITA, ¿DÓNDE ESTÁS?»

Cuanto más lejos está una estrella, menos parece brillar. Pero hay un problema en usar esto para juzgar lo lejos que se halla una estrella. ¿Cómo saber que estamos mirando una estrella brillante que está lejos, como 61 Cygni, que puede verse a simple vista, o una estrella menos brillante que esta más cerca, como Próxima Centauri? El brillo aparente es una combinación del brillo real y de la distancia de la estrella a la Tierra. Así que ¿cómo pueden los astrónomos usar el brillo para determinar la distancia? Resulta que en muchos casos el color de la luz emitida por una estrella nos da la informa-

ción suficiente para deducir lo intensamente que debería brillar, y al medir el brillo aparente podemos saber a qué distancia está.

Al medir la luz que llega de una estrella y analizar las frecuencias, los científicos vieron que no aparecían ciertas frecuencias características. La luz de estas frecuencias era absorbida por los propios átomos de la estrella. Ésta fue la clave para demostrar que Comte estaba equivocado cuando dijo su famosa frase de que nunca podríamos saber la composición química de las estrellas. Pero también pudo usarse para calcular cuánto brillaba una estrella. Cuando los astrónomos examinaron las estrellas cercanas, cuya distancia a nosotros y cuya luminosidad eran conocidas, encontraron una relación directa entre las diferentes frecuencias absorbidas por la estrella y la intensidad de su brillo.

El descubrimiento significó que podrían usarse las frecuencias ausentes de la luz como una medida de la luminosidad absoluta. Ahora los astrónomos podrían mirar a las estrellas que estaban demasiado lejos y aplicar el paralaje. Al medir las frecuencias ausentes y su luminosidad aparente, los astrónomos podrían determinar a qué distancia de nosotros se hallaban esas estrellas. Esto proporcionó a los astrónomos una idea mucho más clara de la verdadera profundidad del espacio.

Sin embargo, la mejor manera de medir las distancias en el universo la acabó proporcionando un púlsar muy especial. Una estrella cefeida parpadea, y en 1912 la astrónoma estadounidense Henrietta Leavitt descubrió cómo usar estos púlsares para investigar el universo. En aquel momento estaba trabajando como «calculadora», y no como astrónoma, en el observatorio del Colegio de Harvard, extrayendo datos de las placas fotográficas por 30 céntimos la hora. A las mujeres no se les permitía manejar los telescopios. A ella se le había asignado la tarea de analizar las estrellas cuyo brillo cambiaba de intensidad periódicamente. Al sentir curiosi-

dad por saber si había algún patrón en los pulsos de estas estrellas, Leavitt concentró su atención en un conjunto de estrellas localizadas en la Pequeña Nube de Magallanes y que por ello se creía que estaban a una distancia parecida de la Tierra.

Cuando comparó la luminosidad con el período de los pulsos, descubrió un patrón claro. El tiempo que tarda una estrella cefeida en pulsar está directamente relacionado con su luminosidad: cuanto más largo es el período de pulsación, más intensamente brilla la estrella. Así que para saber cuánto brilla realmente una estrella cefeida, lo único que necesitamos es medir el período de pulsación, algo que es mucho más fácil de hacer que medir las frecuencias de la luz ausentes. Estas estrellas eran perfectas para medir distancias.

Si una estrella cefeida está pulsando de manera lenta pero parece que brilla débilmente, tiene que estar muy lejos; una estrella cefeida aparentemente brillante y que pulsa deprisa se presenta brillante porque está cerca. Disponiendo de estas nuevas reglas, el universo empezó a tomar forma. Cada vez más estrellas se despegaron de la esfera celeste y se colocaron en su sitio en el mapa reciente de la Vía Láctea. Y se descubrió que nuestra propia estrella, el Sol, estaba acurrucada en un rincón de una masa espiral enorme de estrellas.

Pero ¿era ésta la extensión completa del universo? Había algunos puntos de luz que no parecían ser estrellas individuales, sino la luz que provenía de cientos de miles de millones de estrellas. ¿Eran estas nebulosas parte de nuestra Vía Láctea o formaban otra galaxia como la nuestra pero completamente separada? La primera zona que se investigó fue una pequeña nebulosa identificada por el astrónomo persa al-Sufi en el siglo x. Brilla lo suficiente como para poder ser detectada a simple vista y vino a llamarse la nebulosa de Andrómeda. La propuesta de que ésta y otras nebulosas podrían ser de hecho galaxias por mérito propio fue defendida por primera vez por el astrónomo inglés Thomas Wright en 1750.

Después de leer las ideas de Wright, Immanuel Kant se refirió a ellas románticamente como «universos isla».

El acalorado debate sobre el estatus de estas nebulosas pervivió durante años, y culminó en una confrontación entre grupos rivales en un encuentro que ahora se llama «El gran debate», celebrado en el Museo Smithsonian de Historia Natural en 1920. Estaba en juego la cuestión del tamaño y la extensión del universo. El astrónomo Harlow Shapley defendió que estas nebulosas formaban parte de nuestra galaxia, como probaba el hecho de que brillaban intensamente. Heber Curtis replicó que el número de novas—explosiones termonucleares que pueden sufrir las estrellas—registradas en esta nebulosa excedía todas las registradas en el conjunto de nuestra galaxia. ¿Cómo podría existir una zona tan rica en novas en nuestra galaxia?

Andrómeda fue finalmente expulsada de nuestra galaxia y se probó que era otra galaxia por derecho propio, gracias a las observaciones del astrónomo estadounidense Edwin Hubble, que en 1925 usó el telescopio Hooker, en la cumbre del monte Wilson en California, el telescopio más grande de su tipo en aquel momento, para analizar a qué distancia se encontraba Andrómeda.

Hubble localizó una estrella en especial que pudo usar para calcular esta distancia. En el centro de esta nebulosa se hallaba una de las estrellas cefeidas que había investigado Leavitt. La estrella estaba pulsando, haciéndose más brillante y luego más opaca durante un período de 31 días. El análisis de Leavitt implicaba que estaba ardiendo con mucho brillo, y sin embargo vista a través del telescopio parecía brillar muy débilmente. La combinación del período de pulsación con la medida de la luminosidad aparente de la estrella puso de manifiesto que tenía que estar a 2,5 millones de años luz de nuestro Sol. Sin embargo, las estrellas de la Vía Láctea más alejadas entre sí se había demostrado que se hallaban como mucho a 100.000 años luz. La nueva percepción de Leavitt,

combinada con los cálculos de Hubble, cambió drásticamente nuestra visión del universo. Resultó ser sustancialmente mucho más grande de lo que nadie había imaginado.

El uso que Leavitt hizo de las estrellas cefeidas para desenmarañar el espacio transformó nuestra percepción del universo de tal modo que el matemático sueco Gösta Mittag-Leffler quiso nominarla para el Premio Nobel en 1924. Quedó tremendamente conmovido cuando se enteró de que Leavitt había muerto de cáncer cuatro años antes y por lo tanto no podía ser candidata al premio.

Esta nueva comprensión de la extensión de las galaxias lejanas nos dio una idea de la verdadera naturaleza del espacio. Pero ¿hasta dónde llega el universo pasadas estas galaxias tan distantes? Los primeros exploradores de la Tierra, tras dejar atrás sus casas debieron de tener la impresión de que la Tierra era vasta, quizá infinita. Pero según se viajaba más y más, se iba teniendo la certeza de que la superficie de la Tierra era finita y circunnavegable. ¿Qué pasa entonces con el espacio? Al dejar atrás nuestra galaxia, ¿podemos hacernos una idea de cómo encaja nuestra aldea cósmica en una perspectiva más amplia del espacio?

UN JUEGO ENORME DE ASTEROIDES

Puedo imaginarme fácilmente la Tierra como algo finito pero sin bordes. La superficie de la esfera resuelve este acertijo. Pero ¿cómo puede el espacio ser finito? Una de mis películas favoritas, entre las que exploran este rompecabezas, es *El show de Truman*. Está protagonizada por Jim Carrey, que interpreta el personaje de Truman Burbank, quien no es consciente de que el universo en el que vive es un programa de telerrealidad que se desarrolla en un escenario confinado en una bóveda inmensa. Cuando finalmente le asaltan dudas sobre su mundo, emprende un viaje en bote por las aguas que rodean su ciudad, Seahaven, para acabar descubriendo

que lo que él pensaba que era un cielo ilimitado está en realidad pintado sobre la pared del estudio. Detrás de los límites de su universo, descubre las cámaras que graban cada uno de sus movimientos.

Yo no creo que estemos viviendo en nuestro propio show de Truman. No creo que si nos pusiéramos a viajar por el espacio acabaríamos dando con la pared del estudio o con los bordes de una esfera celeste que encierre el universo como la de mi modelo. Y pienso que la mayor parte de las personas estarán de acuerdo conmigo. Al fin y al cabo, un modelo así solamente plantea la cuestión de qué puede haber después de ese borde. ¿Vamos a encontrarnos con el equipo celeste del programa mirando lo que hacemos? ¿Y qué les pasa a los miembros de ese equipo cuando hacen este mismo viaje en su mundo? ¿Sigue habiendo equipos de diferentes programas una y otra vez? Ésta es la razón por la cual casi toda la gente, al ser apremiada, concluye que la única manera de resolver este enigma es creer en un universo infinito.

Sin embargo, los matemáticos tienen una tercera alternativa, que postula un universo que carece de bordes pero que sin embargo es finito. En este universo se viaja por el espacio hasta que, en vez de seguir camino hacia el infinito, finalmente se encuentra uno dirigiéndose hacia el punto del que partió, igual que cuando un explorador terrestre rodea la Tierra.

Para hacerse una idea de cómo podría funcionar un universo así, es útil considerar un pequeño universo de juguete. El juego Asteroids creado por Atari en 1979 sirve como ejemplo perfecto de un universo bidimensional que es finito pero no tiene bordes. El universo consiste simplemente en una pantalla de ordenador, pero cuando la nave se dirige hacia lo alto de la pantalla, en vez de rebotar en el borde, como en un show de Truman bidimensional, reaparece sin interrupción en la parte baja de la pantalla. Desde el punto de vista de los astronautas que tripulan la nave, ellos viajan indefinidamente por el espacio. Lo mismo pasa si la nave

se dirige a la parte izquierda de la pantalla: no choca contra una pared, sino que sencillamente reaparece por el lado derecho. Los astronautas podrían empezar a reconocer algunos hitos repetitivos, aunque, claro, con un universo cambiante podría ser difícil reconocer algunas cosas al pasar a su lado por segunda o tercera vez.

Este universo de Asteroids tiene de hecho una forma reconocible. Si nos permitimos añadir una dimensión en la que podamos enrollar este universo, podríamos fusionar la parte superior y la inferior de la pantalla para formar un cilindro. Como el borde derecho y el izquierdo de la pantalla también están conectados, podríamos pegar los dos extremos del cilindro para crear una rosquilla o lo que los matemáticos llaman un toro. La superficie de este objeto tridimensional es el universo finito del juego Asteroids.

Si consideramos cualquier objeto tridimensional, su superficie bidimensional proporcionará un universo alternativo que es finito pero carece de fronteras. La superficie de una esfera, por ejemplo, es otro de estos universos bidimensionales. Dichos universos bidimensionales no son meros juegos matemáticos, sino la clave para circunnavegar la Tierra. De hecho, muchas culturas a lo largo del globo se preguntaron si la Tierra continuaba ilimitadamente o si al llegar al borde se caerían por él. El modelo de la Tierra para muchas civilizaciones antiguas consistía en un disco finito rodeado de agua, parecido al mundo de Truman.

Fueron los pitagóricos, en el siglo V a. C., quienes empezaron a plantearse la idea de una Tierra esférica. La desaparición de los barcos en el horizonte, la sombra que proyecta la Tierra sobre la Luna durante los eclipses, la variación de la posición del Sol y de las estrellas cuando uno viaja hacia el sur, contribuyeron a este cambio de perspectiva. El viaje alrededor del mundo de 1522, organizado por Fernando de Magallanes (que fue asesinado en el transcurso del mismo) fue el que probó fuera de toda duda que la Tierra es redonda.

¿Y qué pasa con el universo? ¿Tiene una forma concreta? Nos encontramos en una encrucijada parecida a la que experimentaron aquellas culturas antiguas que contemplaban la Tierra y se preguntaban si continuaba ilimitadamente, tenía algún borde o se replegaba de algún modo sobre ella misma.

Pero ¿cómo se puede replegar sobre sí mismo un universo tridimensional de modo que tenga volumen finito y ningún borde? He aquí el poder de las matemáticas, que nos permite incluir nuestro universo tridimensional en un espacio con más dimensiones y replegarlo sobre sí mismo igual que hicimos con el juego Asteroids. Aunque no podamos representar gráficamente este proceso, el lenguaje de las matemáticas nos proporciona las ecuaciones para describir y—lo que es más importante—explorar las propiedades de estos universos tridimensionales.

Así, por ejemplo, podríamos vivir en una versión tridimensional de Asteroids. Quizá el universo es esencialmente un inmenso cubo con seis caras como el dado de casino. Cuando una nave espacial se aproxima a una de estas caras, en lugar de rebotar sobre ella, sale limpiamente de este universo en forma de cubo por esa cara y reaparece por la opuesta. En el juego Asteroids teníamos dos direcciones que pegamos: la dirección arriba-abajo y la dirección izquierda-derecha. En este universo tridimensional en forma de cubo, también se pega la tercera dirección. Si pudiéramos colocar este cubo en un universo de dimensión cuatro, podríamos replegarlo sobre sí mismo, pegando las caras y construyendo así una rosquilla o toro de dimensión cuatro, cuya superficie tridimensional es nuestro universo.

Pero hay otras formas posibles para éste. Un círculo es una forma finita bidimensional cuya superficie es un universo unidimensional finito. Una esfera es una forma finita tridimensional cuya superficie es un universo bidimensional finito. Se pueden usar las ecuaciones matemáticas para construir una esfera de dimensión cuatro cuya superficie es un univer-

so tridimensional finito. Éste es otro modelo de lo que podría ser nuestro universo.

Aunque las matemáticas nos proporcionan candidatos para universos finitos pero sin límites, ¿cómo podríamos saber si nuestro universo es finito y qué forma tiene, en el caso de que sea finito? ¿Tendrá que aparecer un Magallanes cósmico que circunnavegue el universo? Dada la escala del universo conocido, la exploración humana parece un método bastante inaccesible para probar si es finito o no. Pero ya hay exploradores por ahí que llevan miles de millones de años navegando por el universo y que podrían darnos alguna idea para evaluar si es finito o no: los fotones.

LOS MAGALLANES CÓSMICOS

La luz es una gran exploradora. Estamos bañados de forma constante por luz que ha pasado miles de millones de años atravesando el universo. Parte de esta luz ¿tendrá algo que contarnos que pueda darnos indicios de si el universo es finito? Ya hemos visto lo que podría ocurrirle a una nave espacial que llegara hasta las profundidades del espacio: en estos universos finitos, acabaría finalmente volviendo a su posición inicial, igual que la expedición de Magallanes acabó volviendo a Sevilla en 1522.

Lo mismo le podría pasar a la luz. Imaginemos un fotón que hubiera salido del Sol en sus primeros años de vida, hace aproximadamente 4.500 millones de años. Supongamos que estamos viviendo en la superficie de una rosquilla de dimensión cuatro, el universo en forma de cubo cuyas caras opuestas están fundidas. ¿Qué le pasa a la luz cuando se aproxima a una de estas caras? Que pasa limpiamente a través de ella, reapareciendo por la cara opuesta, y a partir de este momento puede continuar su viaje de vuelta hacia el punto de partida. Siempre que no encuentre nada que obstruya su paso, podría volver y llegar hasta el telescopio de un observador en

la Tierra, que detecta a este fotón por primera vez después de su largo viaje. ¿Qué verá entonces nuestro astrónomo? Bueno, nada especial. Lo que verá será la luz de una estrella lejana en sus primeros años de vida. Sería difícil detectar que lo que está viendo es de hecho el aspecto que presentaba el Sol hace 4.500 millones de años.

Sin embargo, lo que sí que nos presenta es una posible manera de probar que el universo es finito, porque podemos mirar en dirección opuesta para ver si hay o no un patrón similar brillando en la cara opuesta. Algunos investigadores en Francia, Polonia y Estados Unidos han estado observando los diseños de luz procedentes del universo temprano con la esperanza de que algunas secciones de este mapa presentaran coincidencias.

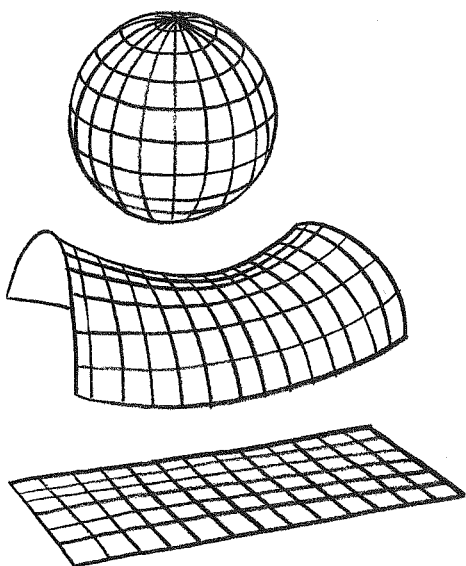
Para su deleite y su sorpresa, pensaron que habían detectado el primer atisbo de ciertas coincidencias en los datos. Comenzaron entonces a analizar qué formas podrían dar lugar a los patrones de longitudes de onda que habían observado. Los resultados sugerían que el mejor candidato para encarnar la forma de un universo que produjera estos patrones era el dodecaedro. Se trata del volumen regular, propio para un dado, limitado por 12 caras pentagonales. Resulta extraordinario que Platón propusiera hace dos mil años que la forma de la esfera celeste con las estrellas grabadas en ella no era una esfera sino un dodecaedro. Pero en esta interpretación moderna, la propuesta es que, como en el cubo fusionado, el espacio estaría constituido a partir del dodecaedro con las caras opuestas fusionadas. Curiosamente, antes de hacerlo, tenían que dar a los pentágonos un pequeño giro de 36 grados. Pero a la mayoría de los astrónomos no les convence esta teoría. Es difícil descartar que las coincidencias en las que se basa no sean resultado del azar.

Hay otro tipo de información sobre la geometría del universo que la luz podría darnos. La luz nos dice cómo se curva el universo. Supongamos que, al salir de su aldea, le da-

mos a nuestro explorador un telescopio y le ponemos a viajar por una llanura sin referencias. Al principio la Tierra parece plana, pero después de un tiempo su curvatura queda claramente al descubierto: al mirar atrás, el explorador ya no ve su aldea, hay algo que se interpone en la mirada. Si la curvatura se mantiene a lo largo de toda la superficie, entonces ésta se acabará replegando sobre sí misma y formando una superficie finita. La curvatura propia de una esfera se llama curvatura positiva. Si una superficie es plana, entonces podría ser infinita y extenderse para siempre, pero podría ser también como en el juego Asteroids, en el que el universo de la pantalla es plano pero finito. Se dice que las superficies planas tienen curvatura igual a cero. Hay otro tipo de curvatura, que es la que presenta una silla de montar o una patata frita Pringle. En este caso la curvatura parece hundirse en una dirección y remontarse en la otra. Este tipo se llama curvatura negativa, en contraste con la curvatura positiva de la superficie de la esfera. Produce superficies infinitas, en vez de superficies finitas como la de la esfera.

Igual que la superficie bidimensional de la Tierra podría curvarse de una u otra manera, resulta que el espacio tridimensional puede también tener curvatura. Midiendo esta curvatura, nos podríamos hacer una idea de cómo se replegaría el espacio sobre sí mismo. Si, como la superficie de la Tierra, el espacio tuviera una curvatura global positiva, el universo se replegaría sobre sí mismo y formaría una figura finita. Si la curvatura fuera negativa, sería infinito. Si es plano, podría ser infinito o finito, como el universo en forma de cubo con las caras opuestas identificadas.

Para detectar la curvatura total del espacio podemos observar a la luz en su viaje por el espacio. ¿Qué vemos? Bueno, parece casi plano, pero es difícil decidir si es verdaderamente plano o si se produce una pequeña curvatura que acabaría por replegarlo sobre sí mismo. Los márgenes parecen ser tan pequeños que es difícil decir si alguna vez seremos



Superficies bidimensionales con curvatura positiva, negativa y nula.

capaces de determinar la curvatura con la precisión suficiente para saber de qué modo se curva el espacio.

Pero hay otro problema a la hora de saber la curvatura del universo. Nuestra exploración del espacio depende mucho de una hipótesis: que vivimos en una porción del universo que no tiene nada de especial. Esta hipótesis recibe el nombre de principio copernicano. Hubo un momento en el que pensamos que estábamos en el centro del universo. Aunque Copérnico ya pagó por sacarnos del error. Así que ahora pensamos que el universo presenta aquí, cerca de nosotros, un aspecto muy parecido al que presenta en cualquier otra parte. Esto es ciertamente lo que parece más evidente. Pero no tiene por qué ser así. Es posible que la parte del universo que vemos sea bastante especial.

Supongamos, por ejemplo, que nuestro explorador de la Tierra hubiera vivido antes en un planeta en forma de he-

misferio: una base perfectamente plana que bruscamente se curva para convertirse en media esfera. Si la aldea de nuestro explorador se hubiera encontrado en la parte llana, éste habría pensado que todo el planeta era plano, hasta toparse súbitamente con la curvatura. Quizá al universo le pase lo mismo: es plano en nuestra porción, pero más allá de la zona que podemos ver, se convierte en algo completamente distinto. ¿Cómo podremos saber alguna vez si nuestro universo es tan homogéneo como pensamos?

Así que el misterio que queda por investigar es ver si la luz está en realidad describiendo círculos en un universo finito, como una expedición de Magallanes cósmica. Si es así, nos dará la posibilidad de descubrir si el universo es o no finito. O quizá se desvía de un modo que no nos permitirá saber cómo se despliega el universo.

Magallanes, por supuesto, navegó por un planeta estático. Resulta que nuestro universo es algo más dinámico de lo que pensamos, como descubrió Hubble, el Magallanes del espacio, al analizar la luz proveniente de las estrellas de galaxias lejanas.

Nos asombra el constante girar del firmamento;
 una linterna mágica nos servirá de ejemplo:
 la lámpara es el Sol, pantalla el universo,
 y las constelaciones rodando en él, nosotros.

OMAR KHAYYAM, *Los Rubaiyat*

Antes me complacía fantasear con la idea de poder mirar al cielo y apuntar con seguridad hacia una estrella o un planeta y anunciar: «Ésa es Betelgeuse» o «Ese punto brillante que se ve ahí no es una estrella, sino el planeta Venus». Pero el problema es que tengo una memoria malísima. Si algo depende del azar, como la distribución de las estrellas sobre el firmamento, al no disponer de una lógica que me guíe, me resulta muy difícil nombrarlas, como no sea el Carro. Ésta es la razón, por supuesto, por la que hemos creado patrones como el Carro u Orión el Cazador, para guiarnos por estos puntos aleatorios de luz.

Y físicamente tampoco parece que esté muy bien adaptado al ejercicio de la astronomía. Mi primer intento de profundizar un poco más en el conocimiento del espacio consistió en acercarme al telescopio alojado en Mill Hill, al norte de Londres. Mi deseo de ver las fronteras del universo quedó frustrado por el azote de los astrónomos: las nubes.

Así que lo siguiente era elevarme por encima de las nubes. Esto exigía mayor esfuerzo que tomar la línea norte hasta Mill Hill. Me fui en tren hasta Suiza, un viaje que culminó con una escarpada ascensión alpina hasta la parada final de Jungfrauoch. Desde allí, un ascensor construido en el interior de la montaña me llevó hasta la cumbre en la que descansa el observatorio Sphinx, a 3.571 metros sobre el nivel del mar.

Construido en 1912, parece la guarida del malo de una película de James Bond. El sol se ponía entre las nieves y los glaciares y yo me disponía a disfrutar de una maravillosa velada contemplando las estrellas. Pero mi cuerpo tenía otros planes. Hacía rato que había empezado a marearme casi hasta las náuseas. No había podido comer mucho. Cuando empezaron a aparecer las primeras estrellas, sentí un dolor de cabeza espantoso. Al poco rato estaba devolviendo. Cuando una pareja de ancianos alemanes dijo que tenía todos los síntomas del mal de altura menos uno, caí de repente en la cuenta de que nunca había estado a tanta altura.

—¿Y cuál es el último síntoma?—pregunté.

—La muerte.

Entonces me di cuenta de que llevar a la práctica mi sueño de astrónomo aficionado no merecía realmente la pena. Me monté en el primer tren que bajaba hasta una altura razonable y enseguida desaparecieron los síntomas. Tenía que reconocerlo: yo era un chico del valle del Támesis nacido en Londres y mi cuerpo estaba diseñado para observar las estrellas desde la comodidad de un telescopio colocado al nivel del mar. Pero las observaciones que se han hecho desde algunos de estos telescopios situados en los techos del mundo han desvelado un hecho destacable. En el futuro, llegará un momento en el que ya no podrán verse tantas estrellas: ¡están desapareciendo en el horizonte cósmico!

EL UNIVERSO VISTO CON UNAS GAFAS DE CRISTALES ROJOS

Cuando pasa una ambulancia con la sirena encendida, nuestros oídos experimentan cómo se atropellan las ondas de sonido según se acerca el vehículo, haciendo que su longitud de onda se acorte, lo que da como resultado que el sonido de la sirena sea más agudo que después de haber pasado. Según se aleja, las ondas se estiran, y resulta una longitud

de onda mayor y un sonido menos agudo. Este fenómeno se conoce como efecto Doppler.

Lo mismo le ocurre a la luz. Cuando una estrella se aleja a toda velocidad de nosotros, su luz se desplaza hacia el rojo, que es el color de mayor longitud de onda. Si se acerca a nosotros, su luz se desplaza hacia el violeta, que tiene longitud de onda más corta. Después de haber descubierto que nuestra galaxia no era especial, sino una entre otras muchas, Edwin Hubble dirigió su atención en 1929 al análisis de la luz proveniente de estas galaxias, para ver cómo se movían con respecto a nosotros. Para su sorpresa, la luz de las estrellas lejanas de las galaxias que observó se desplazaba siempre hacia el rojo. Parecía que no había nada que se aproximara. Era como si todas las galaxias huyeran de nosotros. Y lo que resultaba más interesante todavía: cuanto más lejos estaban las estrellas de nuestra propia estrella, más se desplazaba su luz hacia el rojo. Hubble no quería creer que la Tierra se encontrara en un punto tan especial del universo. Llegó a la conclusión de que había una explicación mucho mejor: el espacio se expande en todas las direcciones a la vez. Desde cualquier punto de observación se verá que todo se aleja. El espacio que hay entre las estrellas y nosotros se estira. Las galaxias son arrastradas por la expansión del espacio como las hojas por el viento.

Aunque normalmente este descubrimiento es atribuido a Hubble, el hecho de que el universo se expande había sido ya pronosticado por el sacerdote jesuita belga Georges Lemaître dos años antes. Lemaître dedujo que el universo ha de expandirse como consecuencia de las ecuaciones de la gravitación de Einstein. Cuando la hipótesis llegó a oídos de Einstein, éste la despachó con una declaración condenatoria: «Sus cálculos podrían ser correctos, pero sus ideas físicas son deleznable». Einstein estaba tan seguro de que Lemaître se equivocaba que acabó incorporando a sus ecuaciones la llamada constante cosmológica, en un intento de

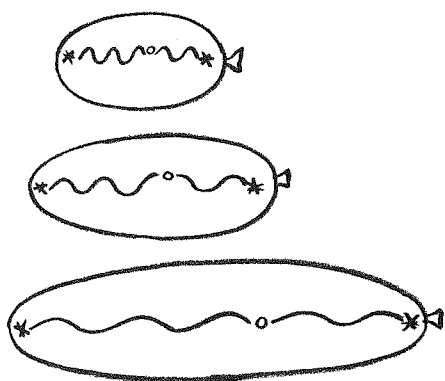
obligar al universo a ser estático y echar por tierra las predicciones del belga.

Lemaître no favoreció especialmente su propia causa publicando sus descubrimientos en una revista belga muy poco conocida. Pero, después de comprobarse que las observaciones de Hubble sustentaban la idea de un universo en expansión, Einstein cambió de parecer. Los descubrimientos de Hubble y Lemaître fueron el primer indicio de que nuestro universo no es estático, como pensaban Einstein y otros muchos científicos. Al contrario, se expande continuamente.

Esta expansión del espacio es la que hace que la longitud de onda que llega se haga más larga, y cuanto más distancia haya recorrido la luz, más se habrá ido estirando gradualmente su longitud de onda. Así que cuanto más intenso es el desplazamiento hacia el rojo, más espacio se ha ido expandiendo por el camino y por lo tanto más lejos de la Tierra estaba la fuente original de la luz.

Para explicar por qué esta expansión cambia las longitudes de onda de la luz, probemos a hinchar un globo con tres puntos marcados en él. Uno representará la Tierra y los otros dos serán estrellas lejanas. Dibujemos dos ondas de luz de una longitud de onda dada entre las estrellas y la Tierra: éste es el aspecto que presenta la luz cuando sale de las estrellas. Cuando la luz de la estrella más próxima llega a la Tierra, el balón se ha hinchado. Si lo inflo un poco, las longitudes de onda se hacen más largas. La luz de la estrella lejana tarda un poco más en llegar a la Tierra, con lo cual el universo se habrá expandido un poco más. Si inflo un poco más el globo, la longitud de onda se alarga de nuevo. Así que cuanto más intenso es el desplazamiento hacia el rojo, más lejos está la estrella de la Tierra.

Éste fue un nuevo método para medir la distancia a las estrellas más remotas. Ha servido a los astrónomos para identificar estrellas que deben estar ahora a 30 mil millones de años luz de nosotros. Puede parecer un poco paradójico que



En el primer globo la luz sale de las estrellas con la misma longitud de onda. En el segundo globo el universo se ha expandido y la luz que venía de la estrella más próxima llega a la Tierra; la longitud de onda se ha hecho más larga. En el tercer globo el universo se ha expandido aún más para cuando llega la luz de la estrella más lejana; la longitud de onda se ha desplazado aún más hacia el rojo.

podamos observar algo que está a una distancia de 30 mil millones de años luz, siendo así que el universo, como luego explicaremos, tiene una edad de 13.800 millones de años, pero recordemos que estamos viendo a la estrella en el pasado, cuando se hallaba más cerca y la luz podía llegar hasta nosotros. La única manera posible de deducir que hoy la estrella está en un punto desde el cual la luz tardaría 30 mil millones de años en llegar hasta nosotros es analizar la expansión matemáticamente.

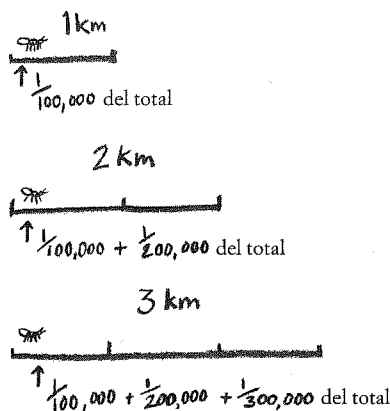
LA HORMIGA Y LA CINTA ELÁSTICA

Si el universo se expande, quizá haya algunas estrellas que quedarán siempre fuera del alcance de nuestra vista, ya que cada vez se alejan más de nosotros. Si el universo se expande a un ritmo constante, incluso en el caso de que ese ritmo sea

superior a la velocidad de la luz, hay un argumento matemático muy bonito que prueba que, aunque haya que esperar un tiempo largo, siempre llegará el momento de ver llegar la luz de cualquier estrella, incluso en el caso de que el universo sea infinito.

La mejor manera de comprender esto es considerar un ejemplo que presenta un resultado curiosamente contraintuitivo. Consideremos una hormiga (que representa un fotón de luz) situada en un extremo de una cinta de goma elástica (el espacio) fija en el otro extremo (la Tierra). El extremo de la cinta en el que está la hormiga al principio representa la galaxia lejana.

Se estira el extremo libre de la cinta a velocidad constante. Supongamos que la cinta tiene al principio una longitud de 1 kilómetro y que cada segundo aumenta 1 kilómetro. La hormiga se mueve sobre la cinta a una velocidad muy inferior, por ejemplo, a 1 centímetro por segundo. A primera vista, con el otro extremo moviéndose a una velocidad relativamente tan grande, parece que la hormiga no tiene oportunidad alguna de llegar jamás a él, igual que la luz de una galaxia lejana parece que no tiene opción de llegar alguna vez a la Tierra, si el espacio entre ellos se expande a velocidad constante.



Hay aquí una serie de sutilezas, así que vamos a añadir una condición para que sea más sencillo hacerse una idea de lo que pasa: la cinta elástica se estira solamente cada vez que transcurre un segundo y lo hace de modo instantáneo. Así que después de 1 segundo la hormiga ha avanzado 1 centímetro, que es $1/100.000$ de la distancia total. Entonces la cinta se estira. La clave es que, aunque la distancia que tiene que recorrer la hormiga ha aumentado, por lo menos ha cubierto una porción de $1/100.000$ de la distancia entre la estrella y la Tierra, ya que el estiramiento ha ayudado a desplazarse otro poco a la hormiga después de su primer avance.

A continuación la hormiga avanza de nuevo 1 centímetro. La cinta elástica tiene 2 kilómetros de longitud. De modo que ahora la hormiga ha cubierto un $1/200.000$ adicional de la distancia total. La proporción total que lleva cubierta es entonces $1/100.000 + 1/200.000$ de esta distancia total. La cinta se estira de nuevo 1 kilómetro. La proporción no ha cambiado con el estiramiento. La cinta mide ahora 3 kilómetros. La hormiga avanza otra vez 1 centímetro. Esto es solamente $1/300.000$ de la distancia total. Cada vez que la cinta elástica se estira, la proporción que el centímetro de la hormiga representa decae. Pero perseveremos: he aquí el poder de las matemáticas. Pasados n segundos, la proporción de la cinta que la hormiga ha recorrido es

$$\frac{1}{100.000} + \frac{1}{200.000} + \frac{1}{300.000} + \dots + \frac{1}{(n \times 100.000)} = \frac{1}{100.000} (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n})$$

Ésta es la serie armónica que calculó hace muchos siglos el matemático Oresme y que vimos al principio del último capítulo. Y probó que esta serie se hace arbitrariamente grande. Así que podemos tomar n suficientemente grande, de modo que la suma sea mayor que 100.000; la proporción de la cinta que la hormiga habrá recorrido entonces será del 100 %. ¡Esto significa que la hormiga ha llegado!

En este ejemplo tenemos que la cinta elástica se estira a un ritmo uniforme. Los astrónomos como Hubble pensaban que era más o menos así como se comportaba el espacio, quizá incluso algo refrenado, ya que la gravedad tendría un efecto desacelerador. Esto implica que, aunque el universo fuera infinito, podríamos ir viendo cada vez más de él simplemente sentándonos a esperar que llegue la luz, como una colonia de hormigas arrastrándose por la cinta expansiva del espacio.

¿No implica esto que, en teoría, si el universo es infinito, estaríamos ya recibiendo luz de estrellas que están a una distancia arbitrariamente lejana? Quizá ya podemos ver un universo infinito. Lo que hay que recordar, no obstante, es que cuanto más lejos se halla la estrella, más atrás en el tiempo estamos viéndola. Si rebobinamos nuestro universo expansivo lo suficiente, veremos que no había ninguna estrella.

EL REBOBINADO DEL UNIVERSO

El descubrimiento por parte de Hubble y Lemaître del universo expansivo fue una prueba de lo que ahora los científicos llaman la Gran Explosión. Si revertimos el tiempo, lo que es un universo expansivo se convierte en un universo contractivo. De seguir contrayéndose, el universo se volvería tan denso que su estado cambiaría drásticamente. De hecho, como comprendió por primera vez Lemaître, en un momento finito del tiempo esta expansión invertida conduce a un universo que es infinitamente denso, un punto que él llamó el átomo primigenio o huevo cósmico. Esta «singularidad» es la que los científicos llaman la Gran Explosión. Dado que éste es un punto en el que la relatividad y la física cuántica deben fundirse en una teoría coherente, todavía hay mucho debate sobre cuánto se puede rebobinar el universo antes de que empiecen a fallar los modelos actuales y se precisen nuevas ideas.

Cuando oí hablar por primera vez de la Gran Explosión en la escuela, pensé que si el universo empezó como un punto ahora tendría que ser finito. Pero con un poco de matemáticas es posible mostrar que un universo infinito puede también nacer de un punto. Esto parece extraordinario. ¿Cómo puede un punto, sin volumen, contener un espacio infinito? Para hacerse una idea de cómo puede ser esto, merece la pena partir de un universo infinito y dar marcha atrás. Imaginemos el espacio infinito un segundo después de la Gran Explosión. Tomemos un punto arbitrario como centro de este universo y consideremos todos los puntos que están a una distancia R de este punto. Todos ellos se hallan sobre la esfera de radio R .

Vamos ahora a rebobinar el universo hacia atrás hasta la hora cero. En el momento $t = \frac{1}{2}$, los puntos que estaban sobre la esfera de radio R se contraerán a puntos sobre la esfera de radio $\frac{1}{2}R$. En el momento $t = \frac{1}{4}$, se habrán contraído sobre una esfera de radio $\frac{1}{4}R$. Si seguimos dividiendo el tiempo por 2 en dirección a la Gran Explosión, esta esfera se irá haciendo cada vez más pequeña, hasta que en el momento $t = 0$ se convierte en un punto. Pero esto vale para cualquier esfera, independientemente de lo grande que sea R . Como cualquier punto de nuestro espacio infinito está en alguna esfera de radio R , cuando se rebobina hasta $t = 0$ se colapsa en el punto que elegimos. Así que en 1 segundo las matemáticas nos proporcionan un método para succionar el espacio infinito en un solo punto sin volumen.

Shakespeare lo expresó muy bellamente cuando Hamlet exclama: «Aun encerrado en una cáscara de nuez podría sentirme rey del espacio infinito». Por supuesto, podemos tropezar con problemas en este modelo si el espacio y el tiempo están cuantizados. Como se vio cuando tratamos de seguir dividiendo por dos el dado indefinidamente, es posible que llegue un momento en el que ya no podamos seguir partiendo los trozos. Este asunto está en el centro del debate cuan-

do se enfrentan la física cuántica y la relatividad general: qué pasa cuando contraemos el universo en un punto.

Muchos llaman a esto los orígenes del universo, y volveremos sobre la naturaleza de lo que se quiere decir cuando se apela a los orígenes y al tiempo en la próxima «frontera». Pero la Gran Explosión tiene ciertamente consecuencias a la hora de discutir en definitiva hasta dónde será posible ver, porque significa que las estrellas no habrían podido existir más de 13.800 millones de años, el tiempo que se estima actualmente que ha transcurrido desde la singularidad. De hecho, el universo necesitó un período de evolución antes de que pudieran formarse las estrellas.

Según nos sumimos en el espacio, estamos viajando también atrás en el tiempo. Como hace 13.800 millones de años no había ninguna estrella, eso quiere decir que nos rodea una esfera más allá de la cual no hay nada que ver. Lo maravilloso es que de esta manera nos encontramos de nuevo con el modelo de universo que propusieron los antiguos griegos. Hay una esfera inmensa con la Tierra en su centro, y los fotones de fuera de esa esfera aún no han tenido tiempo de llegar hasta nosotros. Dicha esfera se va haciendo más grande con el paso del tiempo, y la cuestión de cuánto espacio queda dentro de ese horizonte expansivo resulta tener una respuesta inesperada.

La galaxia más lejana cuya distancia hasta nosotros ha sido confirmada está tan alejada que su luz ha tardado 13.100 millones de años en llegar hasta aquí, hecho que se anunció en octubre de 2013. Sin embargo, eso no significa que esa galaxia se halle a 13.100 millones de años luz de aquí en estos momentos, ya que el espacio que había entre ella y nosotros se ha expandido durante esos años. Los cálculos sugieren que la galaxia está ahora a 30.000 millones de años luz de nosotros. En 2011 se anunció que hay una galaxia que se había desplazado hacia el rojo más todavía, lo cual indicaba que la luz había tardado 13.410 millones de años en alcanzarnos, pero todo ello está todavía sin confirmar.

Podría pensarse que es posible ver luz que proviene de los primeros momentos posteriores a la Gran Explosión. Pero cuando se sigue la pista del estado primitivo del universo, se cree que hubo un tiempo durante el cual la luz no pudo viajar por el espacio porque éste era opaco. Los fotones se encontraban prácticamente asediados por una muchedumbre de partículas. Hubo que esperar 378.000 años después de la Gran Explosión a fin de que la densidad de las partículas bajara lo suficiente para permitir a los fotones iniciar su viaje ininterrumpido a través del espacio. En ese momento el espacio súbitamente disfrutó del desahogo suficiente para que estos fotones volaran por el universo sin toparse con nada que pudiera absorberlos. Estos primeros fotones visibles constituyen lo que llamamos la radiación cósmica de fondo y representan lo más lejos que podemos ver del espacio. Son una especie de fósil cósmico que nos habla del universo primitivo.

Estos primeros fotones que vemos hoy en la radiación cósmica de fondo estaban solamente a 42 millones de años luz de la Tierra cuando iniciaron su viaje. Hoy, se estima que la distancia entre ese punto de partida y la Tierra se ha estirado hasta alcanzar los 45.700 millones de años luz. Éste es el confín del universo visible, el horizonte cósmico visible. Pero la luz no lo es todo.

Aunque la luz no pudo abrirse camino entre el plasma del espacio que había 378.000 años después de la Gran Explosión, los neutrinos sí pudieron. Éstas son partículas a las que, aparentemente, no puede pararlas nada (bueno, casi nada: de vez en cuando chocan con algo que nos permite detectar su existencia). Cada segundo atraviesan nuestro cuerpo, sin que nos demos cuenta, billones de neutrinos. Así que es posible que podamos «ver» un poco más lejos en el espacio si conseguimos detectar los neutrinos que se desligaron 2 segundos después de la Gran Explosión. Quizá podríamos localizar un fondo cósmico de neutrinos, aunque parece que sería muy difícil de detectar.

En cualquier caso, hay una esfera rodeando a la Tierra que representa un horizonte más allá del cual no podemos explorar el espacio ni siquiera con el más inteligente y sofisticado de los telescopios, ya que la luz y los neutrinos—o cualquier otro tipo de información—no han tenido todavía tiempo de llegar hasta nosotros.

Según pasa el tiempo, este horizonte cósmico crece y nos permite ver cada vez más lejos en el espacio. Al menos esto es lo que pensábamos. Sin embargo, en 1998 se descubrió un hecho alarmante: en vez de extenderse más por el espacio, en realidad nuestro horizonte cósmico se contrae. Aunque el horizonte cósmico crece a un ritmo constante, la estructura subyacente del espacio mismo no sólo se expande, sino que esta expansión se acelera. Al hacerlo, está arrastrando cosas que podemos ver hasta más allá del horizonte, lo que implica una consecuencia devastadora: habrá cosas que quedarán fuera del alcance del conocimiento de las generaciones futuras.

LAS ESTRELLAS SE VAN

Algunas estrellas acaban sus vidas con una explosión catastrófica que se llama supernova. La luminosidad es tan intensa que estas supernovas pueden verse desde distancias inmensas. Cuando las supernovas de tipo 1a explotan, tienen todas la misma luminosidad, independientemente del punto del universo en el que se encuentren. Si la comparamos con el brillo aparente, podemos medir lo lejos que están.

Si el universo se expandiera a un ritmo constante, entonces, dada la distancia de una supernova a la Tierra, podríamos predecir el desplazamiento hacia el rojo esperado, basándonos en esa expansión constante. Pero cuando se comparó este desplazamiento teórico hacia el rojo con el desplazamiento hacia el rojo ya calculado de supernovas lejanas, los astrónomos se llevaron una gran sorpresa. Ambos despla-

zamientos no coincidían. Si el universo se expandiera a una velocidad constante, el desplazamiento hacia el rojo habría sido mucho más alto. Para las galaxias más alejadas, cuya luz nos permite ver el pasado, el ritmo de cambio del desplazamiento hacia el rojo era más lento que el medido en galaxias más cercanas. La única conclusión posible era que la expansión del espacio en el universo primitivo había sido mucho más lenta, pero después la expansión se empezó a acelerar, desgarrando el espacio.

Parece que hace aproximadamente 7 mil millones de años ocurrió algo espectacular. Hasta ese momento, la expansión parecía que se iba ralentizando, como era de esperar, teniendo en cuenta que la fuerza gravitatoria de la materia del universo produciría un efecto de freno. Pero en este punto, en mitad del camino de la vida estimada del universo, el ritmo de expansión cambió y comenzó a crecer, aumentando la velocidad como si alguien hubiese pisado súbitamente el pedal del acelerador. El combustible que impulsaba esta aceleración es lo que los científicos llaman energía oscura.

Al parecer, en la primera mitad de la existencia del universo, la densidad de la materia era suficiente para imponer un ritmo lento de empuje pero según el universo se fue expandiendo, esta densidad disminuyó hasta un punto en el que la energía oscura subyacente pudo hacerse valer. No hay que imaginarse que la energía oscura sea algo cuya densidad decrezca con la expansión. Es una propiedad del espacio mismo.

El hecho de que la aceleración continuara traería consecuencias extraordinarias. La esfera que contiene el universo visible crece con el tiempo, lo cual implicaría que podríamos ver más lejos en el espacio. Desgraciadamente, el espacio subyacente se está expandiendo tan rápidamente que las estrellas que antes se hallaban dentro de la esfera del universo visible están siendo desplazadas al otro lado del borde de esta esfera. Así que en el futuro, todas las galaxias excepto

la nuestra desaparecerán de la vista y se quedarán para siempre más allá de los límites de la esfera de nuestro universo visible. Aunque esta misma esfera se expande, nunca lo hará tan deprisa que pueda alcanzar a las galaxias en su loca huida, empujadas por la aceleración del espacio.

Imaginemos que la vida hubiera tardado más en evolucionar y que los humanos hubiéramos empezado a estudiar astronomía después de que todos estos interesantes cuerpos celestes hubieran desaparecido del horizonte. Tendríamos entonces una historia completamente diferente de la evolución del universo. Presentaría el aspecto del universo estático en el que nos parecía que vivíamos antes de que los telescopios fueran capaces de detectar otras galaxias. Así que lo que podemos conocer depende del momento en el que surgimos los seres humanos en el universo. Estamos en una era especial para estudiar astronomía.

En un futuro lejano la astronomía no consistirá en subir a las montañas para escudriñar el espacio con telescopios como el del observatorio Sphinx, sino en consultar libros y revistas con los datos recogidos por generaciones previas de astrónomos antes de que lo que observaron se viera arrastrado fuera de nuestro horizonte cósmico. Quizá la astronomía en el futuro se adapte mejor a los chicos del valle del Támesis como yo, que prefieren las bibliotecas a poca altura en lugar de los observatorios a mucha altura.

Merece la pena señalar que no perderemos las estrellas de nuestra propia galaxia. La atracción gravitatoria local sobre las estrellas de nuestro entorno mantendrá unida a la galaxia. La expansión del espacio no es suficiente para expulsar a las estrellas, pero plantea la cuestión de cuánto ha desaparecido ya de la vista llevándose consigo sus secretos.

Si vamos en un coche y queremos aumentar la velocidad, tenemos que pisar el pedal del acelerador y producir energía quemando gasolina. Entonces, ¿de dónde proviene esa gasolina o energía que produce la aceleración del universo?

¿Se le acabará algún día la gasolina, como pasa con los coches?

La respuesta es que no lo sabemos. Bautizada como «energía oscura», el adjetivo «oscuro» se utiliza en cosmología para señalar algo que no parece interactuar con la luz u otras formas de radiación electromagnética. En otras palabras: no podemos detectarla. Existen conjeturas que especulan con la naturaleza de esta energía oscura. Una de ellas involucra a la famosa constante cosmológica que Einstein insertó en su ecuación para tratar de convertir el universo en algo estático. Pero ahora la constante se usa para disgregar el espacio. Normalmente se piensa que la energía está repartida por el espacio y que se usa o se gasta cuando el espacio se dilata. Pero esta energía se interpreta ahora como una propiedad del espacio mismo. En vez de gastarse, es algo que aumenta cuando el espacio se dilata. En cualquier metro cúbico del espacio es constante. En otras palabras, tiene densidad fija. La aceleración es un proceso galopante que no puede detenerse. Esto no contradice el principio de conservación de la energía porque esta energía oscura se considera energía negativa que compensa el aumento de energía cinética cuando el espacio se expande.

Si la expansión del universo continúa acelerándose, entonces hay una esfera en cuyo centro nos hallamos nosotros y desde fuera de la cual nunca recibiremos información alguna. La información viaja a la velocidad de la luz. En un universo estático, esto significaría que, con el tiempo, cualquier información nos acabaría llegando. En un universo que se expande a un ritmo constante, el ejemplo de la hormiga sobre la cinta elástica muestra de nuevo que la información que viaja por un universo infinito acabaría finalmente llegando hasta nosotros. Pero con una expansión acelerada hay cosas que nunca podrán cubrir el espacio interpuesto con la velocidad suficiente para compensarla. Usando la estimación actual de la constante cosmológica, que presumiblemente es la

responsable de la expansión, se piensa que la esfera desde fuera de la cual nunca recibiremos la información enviada hoy tiene un radio de 18 mil millones de años luz.

Según se estira el espacio entre las estrellas, la luz de éstas se desplaza hacia el rojo, y cuanto más se desplaza la luz, más larga es la longitud de onda. Parecerá que las estrellas se han ido porque la longitud de onda de su luz está tan alargada que ya no podemos detectarla. Esto también afectará a lo que podemos identificar de la radiación cósmica de fondo: la longitud de onda de esos fotones primitivos estará tan alargada que serán casi imposibles de detectar.

Con la radiación cósmica de fondo desplazada de tal manera hacia el rojo que resulta indetectable y con las galaxias desaparecidas de la vista, es chocante pensar que los cosmólogos del futuro puedan carecer de pruebas que sugieran que vivimos en un universo expansivo. Las civilizaciones futuras quizá vuelvan al modelo del universo defendido en la Antigüedad: nuestra galaxia cercana rodeada por el vacío: todo contenido en el icosaedro de papel que monté para entender el espacio. No habría ninguna señal de que el universo es homogéneo. Seríamos como un punto excepcional en un universo lleno de nada.

HUELLAS DACTILARES CÓSMICAS

Si el universo es infinito, parece muy probable que haya cosas que nunca conoceremos. Ciertamente, parece que la estructura del universo nos impedirá observar incluso este hecho. Y, no obstante, el universo que está fuera de nuestro horizonte visible puede con todo dejar su huella dactilar impresa en el espacio que podemos ver.

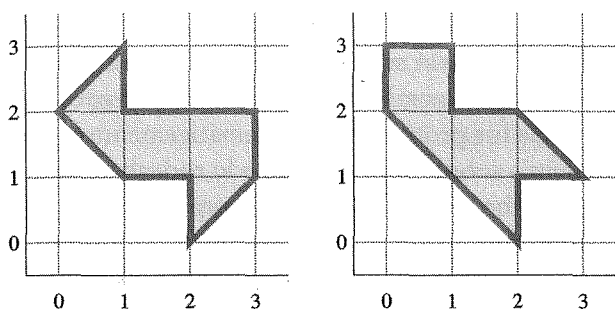
Si el universo es finito, esto limita la posibilidad de ciertas resonancias. Imaginemos el universo como una enorme caja de resonancia, análoga a la de mi violonchelo. La forma del violonchelo se ha elegido a causa del agradable sonido com-

puesto por las frecuencias de resonancia que pueden vibrar dentro de la caja. De hecho, lo que distingue en parte a un Stradivarius de un instrumento industrial es la perfección de la forma, que genera un sonido más bonito.

Uno de los problemas intrigantes que desafió a los matemáticos durante un tiempo fue si era posible o no deducir la forma de la caja de resonancia a partir de la frecuencia de las ondas que vibran en su interior. En un artículo innovador, Mark Kac planteó la cuestión: «¿Se puede oír la forma de un tambor?». Por ejemplo, solamente un cuadrado posee el conjunto especial de frecuencias que produce esta forma. Pero en 1992 los matemáticos Carolyn Gordon, David Wells y Scott Wolpert construyeron dos extrañas formas diferentes cuyas frecuencias de resonancia eran idénticas.

En la búsqueda de las fronteras del universo, el aspecto que a mí me resulta interesante es que las resonancias podrían al menos decirnos si el universo es finito o infinito. Si tenemos una caja finita, entonces la longitud de onda de las ondas que pueden resonar dentro de la caja está limitada por el tamaño de ésta. Si el espacio es infinito, no tendría por qué haber un límite. A mediados de la década de 1990, Jean-Pierre Luminet y sus colegas franceses exploraron la radiación cósmica de fondo para ver qué ondas quedaban de la Gran Explosión. Y pensaron que las ondas de mayor longitud de onda podrían estar ausentes del espectro. ¿Sería porque el espacio no tiene tamaño suficiente para alojar estas ondas?

Datos más refinados obtenidos con la misión Planck, que despegó en 2013, han puesto de manifiesto que no existen pruebas de la ausencia de esas longitudes de onda y que podría acreditar un universo finito. Así que todavía no hay una respuesta clara. Y he aquí uno de los problemas de este dilema: si el universo es finito, posiblemente podamos saberlo alguna vez; pero si es infinito, sería posible quedarnos para siempre en un limbo epistemológico.



Dos tambores con las mismas frecuencias de resonancia.

Aunque las ondas detectadas en la radiación cósmica de fondo no nos dicen si el universo es finito o no, pueden permitirnos estimar un tamaño mínimo para el universo. Las ondas que detectamos pueden darnos de hecho la oportunidad de asomarnos a hurtadillas al otro lado del horizonte cósmico. Como explicaron los científicos soviéticos Leonid Grishchuk y Yákov Zeldóvich en un artículo de 1978, ciertas ondas solamente pueden resonar si la caja en la que estamos es lo suficientemente grande. Patricia Castro, Marian Douspis y Pedro Ferreira han usado las resonancias que podemos detectar para proponer que el universo es al menos 3.900 veces más grande que el espacio que podemos ver.

Otro método mediante el cual podemos deducir cosas sobre el espacio que hay detrás de la frontera de nuestro universo visible es presenciar hechos que solamente pueden ocurrir debidos a la influencia de aquello que hay al otro lado de nuestro horizonte cósmico. Por ejemplo, podría haber algo muy grande detrás del horizonte cósmico que sea lo que está arrastrando a las galaxias que vemos, produciendo un flujo inusual en ciertas zonas del cielo nocturno. Aunque sea cierto que no podemos ver esas cosas, sí podemos al menos presenciar su efecto sobre aquello que podemos ver. Lo que podemos saber no se limita a lo que podemos ver. Así es como sabemos de la materia oscura. El comportamiento gravitativo-

rio de las cosas que podemos ver solamente se explica si hay más materia en algún sitio. Así se descubrió Neptuno. Aunque finalmente vimos Neptuno con nuestros propios ojos, su existencia fue pronosticada matemáticamente por el efecto que ejercía sobre los planetas que lo rodeaban. Si hay algo que no podemos ver más allá de nuestro horizonte cósmico, puede sin embargo alargar sus hilos gravitatorios hasta nuestra burbuja.

Cuando miro el modelo de papel de nuestro universo que tengo sobre la mesa y que representa esta burbuja, es fascinante reflexionar sobre lo pequeños que nos hemos ido haciendo los humanos en relación al todo. Desde que los humanos empezamos a observar el cielo nocturno, cada generación ha ido ajustando su sentido de la escala y modificando la precedente. Al principio parecía que la Tierra era el centro de todo. Después tuvimos que replantearnos nuestra posición en el cosmos cuando nos dimos cuenta de que el Sol estaba en el centro, y que la Tierra no era sino otro planeta más de los muchos que orbitaban en torno a este foco central. Después vimos que todas esas estrellas podrían llevar a remolque sus propios planetas y que nuestro Sol estaba arrinconado en el confín de una galaxia de estrellas. Y luego tuvimos que repensar nuestro lugar en el universo una vez más asimilando el hecho de que hay miles de millones de galaxias en el espacio. La Vía Láctea, al fin y al cabo, no era nada especial.

Se supone que nos hemos acostumbrado a esta inmensa escala, aunque en verdad era casi inabarcable. Sin embargo, algunos descubrimientos que se han hecho durante mi vida—después de haber aceptado mi lugar en el universo—me han obligado a ensanchar de nuevo mis horizontes. Igual que generaciones previas a la nuestra reconocieron que nuestro planeta era realmente uno de muchos, parece que nosotros hemos de enfrentarnos a la posibilidad de que nuestro universo sea simplemente uno de muchos. El primer indicio de

estos otros universos lo proporcionó un curioso enigma secretamente guardado por los primeros fotones que se abrieron camino por nuestro propio universo.

MULTIVERSO

La radiación cósmica de fondo presenta un rasgo curioso. ¿Por qué es tan uniforme? Los fotones que recogemos en los detectores tienen todos una temperatura de 2,725 grados por encima del cero absoluto. Cuando iniciaron su viaje hace aproximadamente 370.000 años después de la Gran Explosión, estaban mucho más calientes, más o menos a 3.000 grados, la temperatura a la que se amalgamaron los electrones y los núcleos para formar átomos. Al expandirse el espacio, los fotones se enfriaron, lo que significa que la energía que contienen, determinada por su frecuencia de vibración, ha decrecido gradualmente, hasta que en la actualidad es tan lenta que encontramos a estos fotones en la zona de las microondas del espectro electromagnético.

Pero ¿por qué todos los fotones tienen casi la misma temperatura? Si dos objetos con diferentes temperaturas están en contacto entre sí, con el tiempo se produce una transferencia de energía entre ellos y ambos adquieren la misma temperatura. Ésta podría parecer una buena explicación, salvo que hay una palabra muy importante en la afirmación anterior: contacto. El contacto solamente puede establecerse a la velocidad de la luz. La distancia a través del espacio era tal que la información no tuvo tiempo de viajar a la velocidad de la luz para informar al otro extremo del universo expansivo sobre cuál era la temperatura.

La única explicación que parecía tener sentido era ésta: para alcanzar una temperatura común, estos dos puntos del espacio deberían de haber estado en contacto entre sí mucho más tiempo que el que nuestro modelo de universo expansivo ha propuesto. A principios de la década de 1980, el

cosmólogo estadounidense Alan Guth dio con una posible solución. En las primeras etapas de la existencia del universo el espacio no se expandía tan rápidamente. Fue un comienzo lento, que permitió al espacio adquirir una temperatura común. Después el espacio entró en una etapa de expansión extraordinariamente rápida que ahora se llama inflación. Se conjetura que el responsable de la misma fue un campo anti-gravitatorio llamado inflatón, que dispersó el espacio a una velocidad exponencial. La rápida inflación no duró mucho: aproximadamente 10^{-36} segundos, según el modelo vigente. Eso es la billonésima de la billonésima de la billonésima parte de un segundo. Sin embargo, se piensa que en ese tiempo el espacio se expandió en un factor de 10^{78} . Es como si hubiera habido una acumulación de presión que se liberó de golpe, y una vez producido este desahogo, el universo se calmó y se estabilizó en el tipo de expansión más tranquila que hemos detectado después.

El modelo ayuda a explicar por qué el universo parece plano y esencialmente muy homogéneo. Las grandes variaciones que vemos, como las galaxias por aquí y el espacio vacío por allá, son de hecho producto de fluctuaciones cuánticas muy pequeñas en la reducida porción del espacio que explotó con esta inflación masiva. La inflación explicaría también por qué el universo parece tan plano: esa inflación habría planchado cualquier curvatura identificable que hubiera habido en el universo primitivo.

Las matemáticas que desarrollaron Andréi Linde en Stanford y Aleksandr Vilenkin en Tufts para explicar esta inflación permiten hacer una predicción extraordinaria. Ésta implica que la inflación no habría ocurrido una sola vez, como hecho aislado, sino que el espacio podría estar inflándose en otras zonas, como lo hizo en nuestro universo. Las fluctuaciones cuánticas que se producen en el espacio hacen que el campo inflatón surja en algunos sitios, creando vastos universos. En otras palabras, podría haber otros universos ahí

fuera, como el nuestro, haciendo que el espacio parezca una especie de queso suizo, en el que los agujeros corresponden a diferentes universos.

¿Podemos siquiera saber si esta descripción del universo es cierta? ¿Será que estamos llegando a historias consistentes en sí mismas que podrían ser ciertas pero son improbables? Incluso en nuestro propio universo parece existir un límite que acota la distancia a la que podemos ver. ¿Cómo podemos abrigar entonces esperanzas de saber si estos otros universos son reales o simplemente fantasías de la física teórica?

Las investigaciones de la existencia de estos otros universos se han centrado en la posibilidad de que podrían interactuar con nuestro universo de modo que dejaran algún tipo de huella. ¿Podría la radiación cósmica de fondo proporcionar pruebas de que nuestro universo chocó con otros universos durante su formación? Ha habido algunas especulaciones sobre el hecho de que las diferencias de temperatura en el mapa del universo primitivo podrían ser el resultado de esas colisiones, pero como admite una de las personas que trabaja en el equipo de la University College de Londres (UCL) que investiga esas posibilidades: «Uno de los muchos dilemas a los que se enfrentan los físicos es que los humanos somos muy propensos a seleccionar lo que nos interesa en los datos y encontrar patrones donde quizá solamente haya coincidencias». Pero no es una búsqueda sin esperanzas. Descubrir pruebas de estos universos vecinos no es *a priori* algo que esté fuera de nuestro alcance. Podríamos llegar a saber cosas. El reto es descubrir caminos por los cuales estos otros universos puedan influir en lo que está dentro de nuestro horizonte cósmico.

CALIBRANDO DISTINTOS UNIVERSOS

Una de las consecuencias intrigantes de estos universos potencialmente incognoscibles que se hallan más allá del nues-

tro es que pueden explicar una de las razones para crear un Dios que esté en el origen de todo. La posibilidad del multiverso podría ofrecer la mejor solución que tenemos hasta ahora de la sensación perturbadora de que nuestro propio universo debe haber sido diseñado.

No hablo de la ilusión de que el diseño biológico condujo a la vida, que es creada por nuestra falta de perspectiva sobre el azar y los largos lapsos de tiempo. Gracias a la evolución darwinista no precisamos de un diseñador. La mecánica interna de nuestro universo es suficiente para haber producido las maravillosas estructuras que existen en nuestro planeta.

Darwin hizo un trabajo excelente al dejar zanjada la necesidad de un diseñador sobrenatural para explicar la complejidad de la vida que vemos en nuestro entorno. Una vez que disponemos de un mecanismo simple como la evolución darwinista para rendir cuentas de la complejidad de la vida, ya no necesitamos a un Dios. Pero lo que nos falta es una buena explicación de las constantes de la naturaleza—unos 20 números, como la masa del electrón, la constante gravitatoria, la velocidad de la luz, la carga del protón—, que tan cuidadosamente calibradas están para poner en marcha y mantener la vida. Aunque tenemos un mecanismo para explicar la vida, carecemos de uno parecido para explicar la física.

No parece haber ninguna razón lógica clara que explique por qué estas constantes asumen esos valores y no otros. ¿Por qué no podrían sintonizarse con otros valores? Lo que resulta especialmente chocante es lo sensible que es la posibilidad de vida en nuestro universo a un pequeño cambio en estas constantes. Por ejemplo, si la constante que controla el modo en que se comporta el campo electromagnético cambia un 4 %, la fusión en las estrellas no podría producir carbono y cualquier tipo de vida existente en ese universo tendría que basarse en otros átomos. Otras constantes resultan ser igualmente sensibles ante pequeños retoques. Si alteramos la constante cosmológica cambiando el decimal que

ocupa el lugar 123, vemos de repente que es imposible tener galaxias habitables.

Ésa es una de las razones por las que aquello que desconocemos y que se sitúa más allá de nuestro horizonte cósmico, con sus universos múltiples, podría ser la solución a este dilema. En el modelo del multiverso hay multitud de universos diferentes, y en cada uno de ellos las constantes fundamentales estarían asignadas al azar. En la mayoría de los casos estos universos no tendrían mucho futuro, ya que las constantes no constituyen en conjunto un entorno favorable para prosperar. Pero en unos pocos, las constantes son las óptimas para que los átomos puedan combinarse de un modo que acabe favoreciendo la vida. Por supuesto, para que podamos ver todo esto, tenemos que estar en uno de estos universos especiales. Esto es lo que se conoce como el punto de vista antrópico.

Yo creo que la mayoría de los científicos confían en que lleguen explicaciones más satisfactorias de por qué el universo es como es, que podremos probar que estas constantes no son realmente aleatorias y que las cosas tenían que ser tal como son. Ampararse en los multiversos tiene pinta de ser meramente una excusa, como si no estuviéramos esforzándonos lo suficiente y llenáramos el hueco con algo que probablemente será imposible de conocer.

Pero quizá así es como son las cosas, y tendremos que conformarnos y aceptar el modelo de los multiversos. La Tierra, por ejemplo, es sólo un planeta al azar que resulta estar en su punto óptimo para la vida. No voy a poder encontrar una razón por la cual tenía que ser así. Hay un sinnúmero de planetas que no consiguieron las condiciones favorables. Nuestro planeta resultó idóneo sólo por suerte. Si he asumido sin problemas una explicación multiplanetaria para la vida, ¿por qué no voy a asumir una explicación multiverso para la física?

Tengo esperanzas de que podamos explicar por qué el universo debe ser como es sin recurrir a la idea de multiverso. En última instancia, puede haber alguna razón por la que este

universo especial se destaque como el más natural. Ésta sería la respuesta preferida para una gran mayoría de los científicos. Una burbuja estable es una esfera sorprendentemente perfecta. Hay otras muchísimas formas tridimensionales que podría adoptar. ¿Por qué precisamente ésta tan perfecta? Lo sabemos bien. Las matemáticas nos dicen que es la forma con menor energía de todas las que existen. Estamos buscando una explicación que justifique que, científicamente, nuestro universo podría disfrutar de unas ventajas análogas a las de la esfera.

Pero probablemente el universo no sea como una burbuja. Posiblemente se aproxime más a un lápiz apoyado sobre la punta al que dejamos caer. Podría caer siguiendo una entre infinitas direcciones posibles. No hay ninguna dirección preferente. La suerte (encarnada en una fluctuación cuántica) determinará la dirección elegida y qué tipo de universo surgirá.

Algunos proponen que existe otra opción: una inteligencia transcendente que calibra con precisión las cosas. Pero esta idea parece una excusa todavía peor. ¿Por qué el multiverso es una respuesta científicamente más satisfactoria? La razón es que la teoría del multiverso tiene—aunque ciertamente de un modo cuando menos extraño—el sentido de la economía que buscamos en una buena teoría. Podríamos decir que una teoría que exige múltiples universos parece extraordinariamente extravagante. Pero es la economía de la explicación la que hace que destaque como plausible. La explicación termina y no requiere más añadidos. Admitir todos estos universos es solamente más de lo mismo, con variaciones. No es nada realmente nuevo, pero una vez incorporados todos estos universos, se llega a una solución del problema del calibre perfecto de las constantes. Un diseñador que determine con precisión las constantes plantea tantas cuestiones como las que resuelve.

AVERIGÜE EL NÚMERO SIGUIENTE

Una buena teoría científica debería ser una propuesta económica que explique cómo se ensamblan las diversas piezas, sin tener que recurrir a demasiados personajes extras en la obra para que ésta se desarrolle según lo previsto. La teoría del multiverso posee una especie de simplicidad y de naturalidad que la convierte en una candidata muy sólida. La física de la inflación proporciona un posible mecanismo para producir estos otros universos, así que no es solamente una hipótesis atrevida. Pero tenemos que ser cuidadosos al considerar las cualidades de simplicidad y economía a la hora de juzgar la posible verdad de una teoría.

Si alguien nos pregunta cuál es el número siguiente de esta serie:

1, 2, 4, 8, 16...

la respuesta obvia sería 32. La mayoría opinará que la multiplicación por 2 es la regla que rige esta serie. Pero ¿qué pasaría si alguien dice que el número siguiente es el 31? Posiblemente nos reiríamos de él. Pero después de saber que esta serie podría describir el número de modos de dividir un círculo, 31 y 32 se convierten ambas en respuestas legítimas. Así que uno podría exigir más datos experimentales como apoyo para decidirse por una u otra explicación.

POR QUÉ 31 ES EL NÚMERO SIGUIENTE...

Marquemos n puntos en una circunferencia y dibujemos rectas que unan cada punto con los demás. ¿En cuántas regiones queda dividido el círculo? El número máximo de regiones que se obtienen a partir de un punto sigue la siguiente secuencia: 1, 2, 4, 8, 16, y entonces con seis puntos hay una sorpresa: se obtiene un máximo de 31 regiones.

Lo interesante es que, por muchos datos que descubramos, siempre es posible dar con una ecuación que proporcione una razón coherente que justifique que cualquier número puede aparecer legítimamente como el siguiente. De modo que, dado un número finito de datos, parece que nunca vamos a poder realmente saber cuál es la explicación de los mismos a menos que consigamos algunos datos más que nos sirvan para poner a prueba nuestra ecuación. Éste es el modelo de la ciencia que propuso el filósofo Karl Popper: una teoría puede ser refutada, pero nunca probada.

Para juzgar si una teoría es buena o no, los científicos suelen aplicar alguna medida de naturalidad, una especie de navaja de Occam que favorezca a una ecuación más que a otra. Cuanto más bajo sea el grado de la ecuación, menos datos hay que introducir para conseguir la respuesta: esto generalmente es muy significativo a la hora de decidir qué explicación apoyar. Por eso la mayoría escogerá el criterio de multiplicar por dos como la explicación obvia de la sucesión, en vez del polinomio de grado cuatro que genera los números que se producen al dividir el círculo.

Así que, cuando nos enfrentamos a dos teorías en pugna y no hay modo de decidir cuál de ellas es la correcta, parece que solemos inclinarnos por la más sencilla. Esto queda recogido en la idea de lo que algunos filósofos llaman «inferencia hacia la mejor explicación» o teoría de la abducción. Pero no hay razón para pensar que la simplicidad garantiza la verdad.

¿Por qué la simplicidad, la economía o la belleza es una buena medida del hecho de estar más cerca de la verdad? De algún modo, la experiencia sirve para apoyar este punto de vista. Nuestra asociación de belleza y verdad proviene de que somos seres programados por la evolución para responder con una descarga de dopamina cuando pensamos que se nos ha ocurrido una idea que nos ayuda a desenvolvernos en nuestro entorno. Así que decimos que las cosas son bellas

porque ésta es la respuesta de nuestro cuerpo a algo que será ventajoso para nuestra supervivencia evolutiva.

¿Qué ocurre cuando se proponen versiones alternativas? ¿Cómo responder a una persona que cree que el universo tiene 5.775 años? Le mostramos el registro fósil y contesta que el universo fue creado viejo. Estas personas construyen para su propio uso una historia que es lógica y consistente, pero en mi opinión muy poco probable. Es difícil discutir con alguien que presenta una teoría que es inmune a las comprobaciones.

Cada vez más nos vemos impelidos hacia argumentos científicos para la evolución del universo que podrían resultar imposibles de comprobar. Si alguien aparece con una teoría que predice nuevas partículas pero ésta no detalla en qué nivel de energía es posible detectar dichas partículas, no habrá pruebas suficientes para convencer a aquellos que creen en ella de que están equivocados: siempre replicarán que esas hipotéticas partículas existen en la región que todavía no hemos sido capaces de reconocer.

Algunos han argumentado que la imposibilidad actual de verificar la teoría del multiverso significa que es tan fantástica como la propuesta de un diseñador sobrenatural que calibra perfectamente todas las cosas. Aunque en este momento no haya ningún medio de comprobar la teoría del multiverso, tampoco existe razón alguna *a priori* para que siempre siga siendo imposible de verificar. Lo mismo es aplicable a la teoría de cuerdas, con frecuencia condenada como teoría científica porque es incapaz de hacer predicciones que sean comprobables. Pero esta justificación no basta para refutarla, ya que no hay ninguna razón para pensar que siempre seguirá siendo imposible de verificar.

Recordemos que la teoría del multiverso, aunque sea potencialmente no comprobable, viene acompañada por un mecanismo, la inflación, que explicaría cómo surgen estos multiversos. Y al menos tenemos pruebas para uno de estos

multiversos: nuestro propio universo. Uno de los criterios necesarios para una teoría científica es que proporcione explicaciones basadas en cosas naturales y no en cosas sobrenaturales. Si uno pretende abogar por algo nuevo, como la «energía oscura» o la «gravedad oscura», es preciso integrarlo en el mundo natural. ¿Cómo se hace esto? Hay que demostrar cómo su comportamiento influye en el resto de cosas que vemos a nuestro alrededor.

Otro criterio que distingue a la buena ciencia es que se puedan hacer experimentos para probar una teoría. Uno de los problemas de la cosmología es que se basa en experimentos que solamente se han podido hacer una vez. Es muy difícil poner en marcha una nueva Gran Explosión y ver lo que pasa esta vez. Dicho esto, es posible replicar las condiciones de la Gran Explosión a pequeña escala en la Tierra, para hacerse una idea de la física del fenómeno cosmológico más grande. Pero, dado que uno estará trabajando dentro de la física que efectivamente surgió, es difícil ver cómo sería posible comprobar si podrían haber surgido, en diferentes momentos de la creación del universo, otras teorías físicas con constantes fundamentales diferentes, o incluso otro tipo de física.

Como los experimentos son inviables, uno de los postulados centrales de la cosmología es el concepto de homogeneidad. Hay que trabajar con la hipótesis de que lo que ocurre en nuestra porción del universo representa también su estructura global. Sin esta hipótesis, todo vale. Suponemos que la manera en que se curva el espacio cerca de nosotros es realmente universal, pero no tiene por qué ser así; es como si alguien que vive en la parte plana de un planeta en forma de hemisferio piensa que todo el planeta es llano, hasta que llega al punto en el que se curva.

Sin la hipótesis de la homogeneidad, ¿cómo podemos descartar la posibilidad de que pase algo sumamente diferente más allá de nuestro horizonte? Quizá alguien haya descargado de internet la plantilla de nuestro universo y la haya mon-

tado como yo hice con la esfera celeste. Quizá nosotros seamos como una casa de muñecas de un ser sobrenatural, sobrenatural en el sentido de que existe fuera de nuestro universo. Si este ser sobrenatural nunca juega con su casa de muñecas, no está claro que seamos capaces de enterarnos algún día. Pero si realmente no ejerce influencia alguna sobre nuestro mundo, no deja de ser un extraño invento. ¿Por qué necesitamos dar rienda suelta a nuestra imaginación? Si este ser sobrenatural juega con la casa de muñecas y hay interacción, entonces estaremos en condiciones de comprobar la idea y será potencialmente comprobable.

¿HAY ALGUIEN AHÍ FUERA?

Sorprende la frecuencia con la que cosmología y religión se han entrecruzado a lo largo de la historia. La cuestión de qué podría haber más allá de los confines del universo ha intrigado siempre tanto a los científicos como a los teólogos. Para el filósofo medieval Oresme, allí era donde se ocultaba Dios. La mayoría de las religiones incluyen un mito creacional para el cosmos. Para los aborígenes australianos, todo salió de las entrañas de la Serpiente Arco Iris. Para los científicos, se trata de la Gran Explosión. Galileo tuvo problemas con la Iglesia católica por desafiar el pensamiento establecido sobre nuestro lugar en el cosmos. Aunque fue un sacerdote católico, Lemaître, el que propuso la teoría científica actual que explica cómo el cosmos surgió de la Gran Explosión.

También en la era actual, la cosmología y la religión se siguen encontrando, a veces en medio de controversias. En 1972 sir John Templeton, un empresario británico nacido en Estados Unidos, promovió un premio que lleva su nombre para reconocer los «progresos en religión». Después ha ido evolucionando y se ha convertido en un galardón que reconoce los «progresos en investigaciones o descubrimientos sobre realidades espirituales». Está dotado con una generosa

cantidad de dinero, en estos momentos 1.200.000 libras esterlinas. Templeton estipuló que el premio sobrepasara al Premio Nobel, ya que pensaba que éste había ignorado injustamente la dimensión espiritual.

Entre los galardonados hay algunos nombres obvios. El primer premio Templeton fue para la Madre Teresa. Los siguientes han recaído en sacerdotes, ministros evangelistas, rabinos y el Dalai Lama. Pero en los últimos años han ido engrosando las filas de los galardonados cada vez más científicos, e invariablemente se trataba de científicos que investigan en cosmología o sobre grandes cuestiones que afectan al universo.

Sin embargo, algunos destacados científicos han criticado a los colegas que han aceptado el premio, ya que piensan que respaldan una visión espiritual o religiosa de las cuestiones científicas. Mi predecesor en el cargo, Richard Dawkins, es uno de esos críticos, y ha dicho que el premio suele ser concedido «a un científico que esté dispuesto a decir algo bonito sobre la religión». El físico Sean Carroll ha escrito sobre sus razones para rechazar la financiación de sus investigaciones proveniente de la Fundación Templeton: «No es una cuestión de compromiso ético, sino sencillamente porque se envía un mensaje equivocado. Cada vez que científicos respetables aceptan dinero de Templeton, prestan su prestigio—aunque sea sólo de manera implícita—en apoyo a la idea de que la ciencia y la religión son simplemente diferentes caminos para alcanzar una única verdad definitiva».

Estaba impaciente por hablar con un cosmólogo que había aceptado el premio. El profesor John Barrow, perteneciente al Departamento de Matemática Aplicada y Física Teórica de la universidad de Cambridge, recibió el Premio Templeton en 2006. En su respuesta a mi correo electrónico fue directo al grano de por qué la cosmología en especial tiene implicaciones en mi concepto de Dios como todo aquello que no podemos saber: «La mayoría de las cuestiones de la cosmo-

logía no tienen respuesta. De hecho, hablaré sobre algunas de ellas en una charla que voy a dar este sábado», explicó.

Perfecto. Una oportunidad para enterarme de cuántos cosmólogos creen que no pueden saber. Sentado en la primera fila de la sala de conferencias, empecé a convencerme, a medida que Barrow iba pasando de una cuestión a otra, de lo poco que probablemente vamos a conseguir saber sobre el universo ahora y en un futuro. Acompañado por las sugestivas imágenes con las que obligatoriamente los astrónomos salpimientan sus presentaciones, Barrow procedió a confirmar todos los temores que había estado acumulando en lo que concierne a lo poco que podemos saber del universo.

La Gran Explosión: «Hace un tiempo finito, en el pasado, parece que el universo tuvo un principio: un momento en el que la densidad era infinita y la temperatura también. No sabemos si ese principio fue real o no».

El tamaño del universo: «No hay duda de que existe una buena porción del universo más allá de nuestro horizonte, pero nunca la hemos visto y la mayor parte de la misma nunca la veremos. Así que cuando alguien pregunta si el universo tuvo un principio, o si es finito o infinito, nunca podemos responder este tipo de preguntas sobre el conjunto del universo».

Cuando me reuní de nuevo con Barrow después de la conferencia y le provoqué mencionándole el asunto de la concesión del Premio Templeton a científicos como él, me explicó por qué pensaba que la Fundación Templeton financiaba y premiaba a los cosmólogos.

—A sir John Templeton le gustaba la ciencia porque implicaba progresos. Creía que la cosmología estaba abordando cuestiones profundas e importantes que todo el mundo debería conocer, independientemente de lo que hiciera, ya fuera filosofía, religión o teología. Sería imposible estudiar estas disciplinas ignorando lo que está pasando en el resto de las ciencias.

Barrow cree que el debate entre ciencia y religión hay que matizarlo todavía mucho.

—Una de las lecciones que ha de aprender la gente que se interesa por la interacción entre ciencia y religión es que es necesario precisar a qué tipo de ciencia nos referimos, porque las interacciones pueden ser muy distintas según los casos.

»La cosmología y la física fundamental nos ponen en contacto con las grandes cuestiones que sabemos que no podremos contestar. Se acostumbra uno a la incertidumbre, a no saber, y hasta cierto punto, a averiguar por qué no podemos saber. La gente que trabaja en biología o en física de laboratorio, como Dawkins, no están hechos a este tipo de situaciones. Piensan que cualquier problema es soluble y que basta con concentrarse en él hasta pulverizarlo.

No es que Barrow minusvalore lo que hacen.

—La gente siempre piensa que como estamos estudiando el universo, éste debe de ser el problema más difícil de todos. Nada de eso. Comprender el cerebro, por ejemplo, es un asunto mucho más difícil. Es mucho más complicado. En cosmología las cosas pasan muy despacio, hay bonitas aproximaciones que nos ayudan a comprender. Uno puede seleccionar una solución simétrica sencilla y luego iterarla. Esto no se puede hacer con la sociedad humana. No hay ningún modelo sencillo.

Pero Barrow cree que la ciencia a la que él está consagrado posee un rasgo marcadamente distinto.

—En física fundamental y en cosmología sabemos que hay problemas que no resolveremos. ¿Por qué existen las leyes de la naturaleza? La cuestión del número de dimensiones del espacio y del tiempo. Si hay o no un multiverso. ¿Hubo una singularidad inicial? ¿Es el universo infinito? Se podrían citar infinidad de cuestiones que no vamos a poder resolver. Esto le da otro cariz.

Barrow recibió el Premio Templeton por subrayar en su trabajo las limitaciones intrínsecas de la investigación cien-

tífica. Hay una tendencia creciente a pensar que la ciencia será capaz finalmente de llenar todas las lagunas, y Barrow está deseoso de refrenar esta fe en el poder de la ciencia para conocerlo todo.

—El universo no está construido a nuestra conveniencia. No es un ejercicio de filosofía de la ciencia. Si no podemos descubrir algunas cosas, peor para nosotros, habrá que aguantarse. De hecho, tendría muchas reticencias si resultara que todas estas cuestiones fundamentales se pudieran resolver con lo que estamos haciendo. Me parecería anticonceptivo. De modo que considero el hecho de que no podamos resolver ciertos problemas, o que no podamos obtener los datos que necesitamos, como un aspecto copernicano de las cosas.

CISNES NEGROS, SESGOS Y

EL FINAL DEL LIBRO

Barrow cree que hemos de reconocer que tenemos una visión tremendamente sesgada de nuestro universo:

—La mayor parte de la astronomía está basada en la observación de cosas que brillan en la oscuridad: estrellas de galaxias lejanas, lo que llamamos materia luminosa. Solamente el 5 % del universo se compone de materia corriente con la que estamos hechos nosotros y las estrellas luminosas. La materia luminosa está bastante sesgada. Nos habla de lugares del universo en los que la densidad se hizo tan alta que se pudieron desencadenar reacciones nucleares y producir luminosidad.

En cierto sentido, esto se aplica a toda la ciencia. Nuestra visión del universo está sesgada hacia los aspectos que impactan nuestros sentidos. Lo que no lo hace no va a ser percibido.

—Si uno viviera en un planeta que está siempre cubierto de nubes—llamémoslo planeta Mánchester—no habría as-

tronomía. Sin embargo, se sabría un montón tremendo de cosas sobre meteorología.

En opinión de Barrow, la cosmología tiene rasgos muy diferentes a los de otras ciencias como la física o las ciencias humanas, y ésta puede ser la clave que explique su estrecha relación con la teología.

—A diferencia de un cosmólogo, un científico está acostumbrado a realizar experimentos y a comprobar teorías. Pero no se puede experimentar con el universo. Sencillamente hay que aceptarlo como es.

Muchos científicos modernos se han adherido a la filosofía propuesta por Karl Popper: en realidad, nunca puede probarse que una teoría científica es correcta. Lo mejor que puede hacerse es tratar de probar que es falsa. Todos los cisnes son blancos. Esto nunca puede probarse. Lo mejor que puede hacerse es probar que la afirmación es falsa, encontrando un cisne negro. En el libro de Popper, todo lo que no se pueda probar que sea falso es por lo tanto acientífico. Así que, si en cosmología no pueden hacerse experimentos, ¿grandes porciones de la misma son acientíficas? Barrow no estaba dispuesto a rendirse tan pronto.

—La filosofía de la ciencia de Popper es increíblemente ingenua. Realmente no tiene ninguna vigencia en la astronomía porque al realizar las observaciones no se sabe si se han hecho correctamente. Así que la predicción podría ser errónea porque se hubiera hecho algo mal en el experimento. O más probablemente todavía, podría haber algún sesgo debido al método utilizado para conseguir la prueba.

Los cisnes negros pueden parecer bastante incriminatorios para una teoría que dice que todos los cisnes son blancos, pero analizando más sutilmente la cuestión, es posible que esté muy poco claro si es la teoría la que falla o la prueba, con lo cual no habría que rechazar la teoría tan rápido. Quizá el cisne se rebozó con hollín justo antes del experimento.

Barrow cree que la cosmología podría tener su propio momento «cisne negro».

—En lo que afecta a los datos, el punto clave en todas estas cuestiones fundamentales capaz realmente de cambiar las cosas, de un modo que por mucho que nosotros pensásemos nunca podríamos conseguir, es establecer contacto con una civilización extraterrestre muy adelantada que haya evolucionado independientemente y saber cómo han resuelto ellos algunas de estas cuestiones. ¿Les han resultado útiles el mismo tipo de matemáticas? ¿Han desarrollado la física de la misma manera? ¿Definen las constantes fundamentales de modo que tengan sentido para nosotros? ¿Qué piensan sobre todas estas cuestiones fundamentales? Ésta sí que sería una fuente de datos insuperablemente importante y supone el motivo más importante para establecer contacto con extraterrestres.

Dadas las respuestas que esta civilización avanzada podría aportar a las cuestiones fundamentales, pensé que Barrow estaría entusiasmado con la posibilidad del contacto. Pero me llevé una sorpresa.

—En el aspecto científico creo que sería un desastre. Si estableciéramos contacto con una civilización muy avanzada que hubiera contestado todas las cuestiones que hemos planteado, el juego habría terminado. Nos quedaríamos sin motivaciones para la investigación científica. Sería como mirar las últimas páginas del libro, en las que se encuentran todas las respuestas.

¿No le gustaría poder hacer eso?

—Creo que sería un desastre.

Igual que Melissa Franklin, la investigadora en física de partículas que en la segunda «frontera» no quiso apretar el botón que le daría el conocimiento completo, Barrow tampoco es partidario de mirar el solucionario al final del libro. Pero, al contrario que Franklin, Barrow está convencido de que hay cuestiones que ni siquiera la más avanzada de las ci-

vilizaciones será capaz de contestar. Esas páginas finales del libro permanecerán en blanco para siempre.

—La mala noticia es que la cosmología tiene incógnitas incognoscibles: cosas que nunca vamos a conocer, aunque sospechamos que podríamos saber que existen.

HAY QUE ELEGIR

Muchos defenderían que ante una cuestión incognoscible no queda más remedio que permanecer agnóstico, de modo que sentí curiosidad por conocer la postura de Barrow ante el problema de Dios. ¿Era agnóstico? ¿Ateo? «Cristiano, en realidad», respondió.

Esto sí que fue una sorpresa. Había oído hablar a Barrow muchas veces, había leído muchos de sus libros, pero, al contrario que Polkinghorne, no lleva su elección escrita en la frente (o rodeándole el cuello, como el alzacuellos de Polkinghorne). Aunque me doy cuenta de que también yo he hecho una elección al declararme ateo. No creo que la única respuesta lógica a la existencia de una pregunta que no tiene respuesta sea mirar al toro desde la barrera.

Nuestra creencia en una posible respuesta a una cuestión incognoscible puede tener implicaciones en las actitudes vitales que adoptamos. Consideremos, por ejemplo, la cuestión de si el universo es infinito o no. Ésta puede muy bien ser una pregunta que nunca podremos responder. ¿Deberíamos mantenernos agnósticos sin más frente a este asunto?

Una buena idea es considerar el argumento de la apuesta de Pascal aplicado a este caso. Si el universo es infinito, entonces (seguramente) nunca lo sabremos. Pero si el universo es finito, es posible que alguna vez podamos saberlo. Pero entonces, la mejor estrategia ¿no será elegir creer que el universo es finito? Al final, si el universo es infinito nadie podrá demostrar que estamos equivocados, pero si es finito quizá tengan que darnos alguna vez la razón.

POR QUÉ PODRÍA HABER INFINITAS COPIAS
DE UNO MISMO LEYENDO ESTE LIBRO

Esto depende de un par de hipótesis. La primera proviene de la física cuántica: a saber, que todas las cosas que hay en el universo están cuantizadas. Esto significa que en una región finita del espacio hay solamente un número finito de puntos que solamente pueden tomar un número finito de valores.

Una versión simplificada de este universo podría ser un tablero de ajedrez infinito en el que cada casilla sea blanca o negra. Consideremos una porción de este tablero que supuestamente represente toda la complejidad de la vida, incluido uno mismo leyendo este libro. Supongamos, por ejemplo, que es una región 10×10 con una distribución concreta de casillas blancas y negras.

Un modelo del universo entero podría considerar que fuera de esta región 10×10 el resto de las casillas son todas negras. Esto representaría algo así como el vacío. De modo que necesitamos otra hipótesis. Ésta es que es igual de probable que pueda aparecer uno cualquiera de los posibles patrones. Ninguno de los patrones resulta favorecido en relación a todos los demás. Como solamente hay un número finito de posibles patrones y hay infinitas celdas 10×10 en el universo, si nuestro patrón apareciera solamente un número finito de veces, debería haber otro patrón que apareciera infinitas veces, y sería entonces infinitamente más probable, lo cual contradiría nuestra segunda hipótesis. Esto significa que nuestro patrón ha de repetirse infinitas veces a lo largo de este universo tipo tablero de ajedrez.

Pero ¿qué pasa si un universo infinito ofrece un entorno más atractivo en el que desarrollar uno su vida? Un universo infinito tiene algunas implicaciones interesantes. Una de ellas es que hay infinitas copias de uno mismo por el univer-

so leyendo este libro. El impacto psicológico de esta conclusión, que se inferiría de la creencia en un universo infinito, podría tener efectos drásticos sobre la actitud que uno adopta ante la vida.

Creo que éste es el motivo por el que yo rechazo la apuesta original de Pascal sobre la existencia de Dios (en el sentido convencional de la existencia de una inteligencia sobrenatural que creó el universo) y elijo declararme ateo. En última instancia la respuesta afecta a mi actitud ante la vida. No niego que ésta sea una cuestión cuya respuesta quizá nunca sabré, pero admitir tal esfuerzo imaginativo en la realidad cotidiana de mi vida abriría muchas otras posibilidades descabelladas. Va contra mi predisposición natural a buscar la mejor explicación. Creer en multiversos es simplemente crear más de lo mismo pero con variaciones. Quizá no sea la mejor explicación de todas, pero sí es al menos una explicación mejor que otras.

¿PODEMOS SABER REALMENTE QUE NUNCA SABREMOS?

Después de dejar a Barrow en su despacho, me sentí bastante alicaído. Ya sé que iba en busca de cosas que no podemos conocer, pero ahora estaba empezando a dudar si era o no posible saber algo. Durante el camino de vuelta a casa, una frase de uno de los libros de Barrow resonaba en mi cabeza: «La idea de lo imposible hace saltar la alarma en las mentes de muchos. Para algunos, cualquier comentario de que podría haber límites en el proyecto de comprensión humana del universo o en el progreso científico es un recordatorio peligroso que mina la confianza en la empresa científica».

Revisando las «fronteras» que hemos visitado hasta ahora, veo que nada parece tan desprovisto de respuesta como la cuestión de si el universo es infinito o no. La teoría del caos nos dice que el futuro es impredecible, pero sencillamente

basta esperar a que se convierta en presente para conocerlo. Al ir troceando el dado, podríamos llegar de hecho a un punto en el que el espacio esté cuantizado, de modo que sea posible que solamente haya que dar un número finito de pasos en el proceso de dividir el dado hasta llegar a lo indivisible. Es verdad que podría ser casi imposible transitar por esta escalera descendente, pero no es un desafío *a priori* irresoluble. Y el principio de incertidumbre de Heisenberg no nos prohíbe encontrar una respuesta, sino que nos obliga a reconsiderar si las cuestiones que nos preguntamos están o no bien planteadas. No es que no podamos conocer la posición y el momento simultáneamente; la revelación es que ésta es una cuestión que no tiene sentido plantearse.

Sin embargo, la cuestión de si el universo es infinito o no, no parece ser una de las mal planteadas. O lo es, o no lo es. Si es infinito, es un auténtico reto pensar en cómo será posible saberlo alguna vez, dado que hemos descubierto el horizonte cósmico, más allá del cual nunca podremos saber lo que pasa.

Entonces tuve una revelación. Quizá la cuestión de la infinitud del universo no es tan imposible de resolver como parece. ¿No podría haber medios indirectos que nos lleven a la conclusión de que el universo es infinito? La respuesta podría estar en mi propia área de investigación. Las matemáticas han sido un telescopio muy potente para escudriñar el universo. ¿Qué pasaría si las leyes actuales de la física conducen a una contradicción matemática si suponemos que el universo es finito? Esto nos obligaría a deducir que el universo ha de ser infinito o que nuestras leyes de la física tienen algún fallo. Al fin y al cabo, así es como se descubrieron los números irracionales, cuyo desarrollo decimal continúa indefinidamente y nunca se repite.

He aquí el poder de las matemáticas: usar nuestros cerebros finitos para saber sobre el infinito. Los pitagóricos demostraron que la longitud de la diagonal de un cuadrado con lados de longitud uno está dada por un número que no puede

escribirse como un cociente sencillo entre dos números enteros. La única manera de que esta longitud pueda existir es que haya números que solamente pueden ser descritos mediante un desarrollo decimal que es infinito y que nunca se repite. Quizá el hecho de que el universo es infinito también podría ser susceptible de una prueba que utilice las mismas herramientas que nos ayudaron a descubrir los números irracionales: una prueba por contradicción.

Quizá la auténtica lección es que «lo que nunca sabremos» es algo que nunca podemos saber debido a lo difícil que es excluir la posibilidad de nuevas ideas que podrían llevar las incógnitas hasta el terreno de lo conocido: esto es lo que Comte vio cuando descubrimos de qué estaban hechas las estrellas.

Aunque el universo que nunca seremos capaces de ver o explorar sea finito, como el modelo de papel que tengo sobre mi mesa, quizá el mensaje sea que no hemos de rendirnos tan pronto al señuelo de lo imposible de saber. Los telescopios matemáticos de la mente podrían algún día permitirnos rasgar el papel y saber que nuestra esfera en realidad descansa en una extensión infinita de espacio.

QUINTA FRONTERA:
EL RELOJ DE PULSERA

No se puede pedir de nadie cuya palabra para «ayer» es la misma que para «mañana» que tenga una noción firme del tiempo.

SALMAN RUSHDIE, *Hijos de la medianoche*

Son las 8:50... más o menos... o eso es lo que dice mi reloj. El débil sol de febrero trata de escalar sobre los tejados de las casas de enfrente. La radio está encendida y el café va saliendo. Un día más. Pero los acordes de la *Cenicienta* de Prokófiev que hacen vibrar los altavoces de la radio me recuerdan con alarma que el tiempo apremia. Las campanadas de las doce en punto le avisan a Cenicienta de que el baile ha terminado. Y aquí estoy yo, perdiendo el tiempo metido en internet. Acabo de teclear mi fecha de nacimiento en Wolfram Alpha y me dice que llevo viviendo 18.075 días. Pero cuando pregunto cuántos días me quedan, me contesta que no entiende mi pregunta. Probablemente es mejor así. No estoy seguro de querer saber cuántas veces las manecillas de mi reloj completarán una vuelta completa antes de que se pare el pulso que late a su lado.

Cuando era más joven, pensaba que sería posible saberlo todo. Simplemente se necesitaba tiempo. Según pasan los años, empiezo a darme cuenta de que el tiempo se agota. La sensación juvenil de infinitud se va convirtiendo en el reconocimiento de la finitud, propio de la edad madura. Es posible que no pueda saberlo todo. Pero ésta es una limitación personal, sobre la que volveré en la próxima «frontera». Sin embargo, ¿hay alguna esperanza de que la humanidad pueda saberlo todo? ¿O se nos acabará agotando el tiempo también como colectividad? ¿Se acabará alguna vez el tiempo

definitivamente? Puede muy bien ocurrir que nunca sepamos si el espacio es infinito o no. Pero ¿el tiempo? Creo que todos tenemos la sensación de que el tiempo seguirá transcurriendo. Mientras le cambie regularmente las pilas a mi reloj, seguirá en marcha. Pero cuando volvemos nuestra atención al extremo opuesto, la gente ya no está tan segura: ¿tuvo el tiempo un comienzo o está ahí desde siempre?

Es posible que no pueda ver el futuro y hacer predicciones, pero el pasado ha ocurrido. ¿Por qué no vamos a poder mirar atrás y ver si el tiempo se extiende sin fin hacia el pasado o tuvo un comienzo? Si seguimos la pista a la expansión del universo hacia atrás llegamos a un momento que llamamos la Gran Explosión, en el que el espacio era infinitamente denso, una singularidad que ocurrió hace 13.800 millones de años. Pero ¿qué había antes de la Gran Explosión? ¿Se trata simplemente de un área de acceso prohibido para la ciencia? ¿O hay algunos indicios en el estado actual del universo que podrían mostrarnos qué pasaba antes de que empezara todo?

La naturaleza del tiempo ha preocupado a los filósofos y a los científicos durante generaciones, porque ligado al intento de comprender este concepto resbaladizo está el reto de entender por qué hay algo en vez de nada. Hablar sobre el momento de la creación es hacerlo sobre un momento en el tiempo.

La Gran Explosión representa ciertamente el comienzo para la mayoría de las personas. Incluso con inclinaciones religiosas tienden a aceptar la Gran Explosión como el momento de creación del universo. En todo caso, nos vemos conducidos inevitablemente a preguntar: ¿qué ocurrió antes de la Gran Explosión?

He de admitir que me gustaba bastante la contundente respuesta que he recibido al conversar con cosmólogos matemáticos amigos a lo largo de los años. Hablar sobre un «antes» presupone la existencia del tiempo como concepto anterior a la Gran Explosión. Dadas las revelaciones de la teoría de la relatividad de Einstein—que el tiempo y el espacio

se encuentran indisolublemente ligados—, quizá el tiempo existe solamente una vez que ha sido creado el espacio. Entonces, si el tiempo junto con el espacio surgieron precisamente con la Gran Explosión, el concepto de tiempo «antes» de la Gran Explosión no tiene sentido.

No obstante, se oyen rumores en los pasillos cosmológicos. Quizá el tiempo no puede ser empaquetado matemáticamente de un modo tan simple. Quizá la cuestión de lo que pasó antes de la Gran Explosión no se pueda despachar tan fácilmente. Pero tratar de desentrañar el tiempo implica sumergirse en algunas ideas un tanto alucinantes.

Cuando observo atentamente mi reloj, de hecho no distingo que las agujas se muevan, pero sí al apartar la vista y volver a mirarlo después de un rato. Ahora señala las 9:15... o algo parecido. En su interior, unos engranajes diminutos se mueven al son de un minúsculo motor eléctrico que a su vez está alimentado por pulsos que llegan cada segundo de las oscilaciones de un pequeño cristal de cuarzo. La pila instalada mantiene una diferencia de voltaje en el cristal que hace que éste vibre como una campana con una frecuencia calibrada de 32.768 vibraciones por segundo. Se ha elegido este número por sus propiedades matemáticas. Se trata de 2 elevado a 15. A la tecnología digital le encantan las potencias de 2 porque los circuitos de los ordenadores pueden convertir rápidamente estas vibraciones en un impulso mecánico que mueve los engranajes cada segundo. Lo importante es que esta frecuencia no resulta muy afectada ni por la temperatura ambiente, ni por la presión atmosférica, ni por la altitud (factores que sí que afectan por ejemplo a los péndulos). Y esta vibración, esta repetición del movimiento, es la clave para registrar el paso del tiempo. Pero ¿es esto suficiente para describir la idea del tiempo?

Con mi reloj marcando el paso del tiempo en mi muñeca, ya no quedan excusas para seguir dejando las cosas para después. Así que...

¿QUÉ ES EL TIEMPO?

La mayoría de los intentos de definir el tiempo rápidamente topan con dificultades que se convierten fácilmente en circulares. Es algo que controla mi reloj... Es lo que impide que ocurra todo a la vez... El teólogo san Agustín, que vivió en el siglo IV, resumió muy bien la dificultad en sus *Confesiones*: «¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; pero si quiero explicárselo al que me lo pregunta, no lo sé».

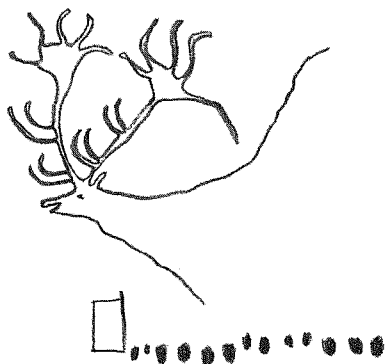
En el fondo, la medida del tiempo es un proceso muy matemático. Depende de señalar cosas que se repiten, que siguen un patrón, como el movimiento de los planetas, el paso de las estaciones, las oscilaciones de un péndulo o las radiaciones de un átomo. Como lo expresó en el siglo XIX el físico austríaco Ernst Mach: «El tiempo es una abstracción a la que llegamos a partir de los cambios que sufren las cosas».

Se cree que las cuevas de Lascaux en Francia contienen pruebas de uno de los primeros intentos de los humanos de llevar la cuenta del tiempo. Las cuevas, de 15.000 años de antigüedad, fueron descubiertas por cuatro muchachos franceses después de que su perro *Robot* se colara por un hueco que conducía hasta éstas. Las cuevas son famosas por las extraordinarias pinturas paleolíticas de animales que ocupan sus paredes: bisontes, caballos, ciervos y uros.

He tenido ocasión de visitarlas, pero debido a la naturaleza tan delicada de estas pinturas prehistóricas, solamente pude ver la réplica de las cuevas originales que han montado a su lado. Siguen siendo tremendamente evocadoras; las viejas imágenes transmiten con fuerza un sentido dramático de la energía. Pero el artista no sólo describió animales. Hay también extrañas filas de puntos que acompañan a las imágenes; algunos arqueólogos creen que son prueba de los intentos de estos seres humanos remotos de llevar la cuenta del tiempo.

Se cree que una de estas colecciones de puntos es una descripción de la constelación de las Pléyades. La reaparición de

esta constelación en el cielo nocturno era para muchas culturas antiguas señal del comienzo del nuevo año. Recorriendo la cueva di con una serie de trece puntos con un rectángulo dibujado al final. Sobre el rectángulo hay una imagen enorme de un ciervo en celo. Siguiendo la misma pared, aparece una sucesión de 26 puntos acompañada al final de una enorme vaca embarazada.



Algunos arqueólogos han interpretado los puntos como marcas que representan los cuartos del ciclo de la Luna, lo que acabarían siendo los siete días de la semana. Estas fases de la Luna eran fácilmente identificables en el cielo nocturno. Así que 13 cuartos de la Luna representan un cuarto de un año, o una estación. Si contamos un cuarto de un año a partir de la reaparición de las Pléyades, nos colocamos en la época de los ciervos en celo, en la que es más fácil cazarlos. Entonces los 26 puntos pueden interpretarse como dos series de 13 puntos, que representan dos estaciones, o medio año. Esto nos lleva hasta la época del año en el que las hembras de bisonte está embarazadas y son de nuevo vulnerables y fáciles de cazar.

Las pinturas de las paredes podrían representar un manual de aprendizaje para jóvenes cazadores: un calendario que les mostraría qué cazar en cada época del año. Esta mues-

tra temprana de control del tiempo se basa en la observación de patrones que se repiten. La identificación de patrones repetitivos sería siempre la clave para entender la naturaleza del tiempo.

Los ciclos del Sol, de la Luna y de las estrellas fueron los que regularon nuestro modo de medir el tiempo hasta 1967. En el ciclo natural no había nada que dictara cómo repartimos el día. Fue la sensibilidad matemática de los babilonios y de los egipcios la que nos dio un día dividido en 24 unidades de tiempo y una hora dividida a su vez en 60 unidades. La elección de los números 24 y 60 se basaba en su gran divisibilidad. Napoleón intentó convertir el tiempo en decimal introduciendo un día de diez horas, con el fin de que todo el mundo hiciera sus cuentas con los diez dedos de las manos, pero fue casi la única unidad de medida que no logró imponer.

Hasta 1967, el segundo, la unidad básica para medir el tiempo, fue definido de diversas maneras a partir del tiempo que tarda la Tierra en girar sobre su propio eje o el que tarda en orbitar alrededor del Sol, ninguno de ellos tiempos que sean muy constantes si los comparamos con el concepto moderno de medida del tiempo. Por ejemplo, hace 600 millones de años la Tierra giraba una vez sobre su eje cada 22 horas y tardaba 400 días en orbitar alrededor del Sol. Pero las mareas de los océanos tienen el extraño efecto de transferir energía de la rotación de la Tierra a la Luna, lo que hace que la rotación de la Tierra se ralentice y que la Luna se vaya alejando de nosotros. Efectos parecidos hacen que la Tierra y el Sol se alejen mutuamente, y que cambie por lo tanto el tiempo que tarda la Tierra en completar una órbita.

Dados los caprichos de los movimientos de los planetas, a partir de 1967, en vez de medir el paso del tiempo mirando al universo, los metrólogos se fijaron en el átomo para definir el segundo, que ahora se entiende que es: «la duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación emitida en la

transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de cesio (^{133}Cs) en reposo y a una temperatura de 0 grados Kelvin».

Menuda parrafada. Y el reloj que realiza la medida es digno de ver. Visité el Laboratorio Físico Nacional al sur de Londres para ver el reloj atómico que le dice al Big Ben y a los pitidos de la radio cuándo deben dar la hora. Es enorme. Desde luego, nada parecido a algo que uno pueda llevar en la muñeca. Incluye seis láseres que atrapan a los átomos de cesio y los lanzan después hacia arriba hasta una cámara de microondas. Al caer de nuevo por efecto de la gravedad, formando lo que se llama una fuente de cesio, los átomos son atacados por las microondas, las causantes de que éstos emitan las radiaciones cuyas frecuencias se utilizan para definir el segundo.

Los relojes atómicos alojados en los laboratorios nacionales por todo el mundo son algunos de los instrumentos de medición más extraordinarios creados por los seres humanos. La regularidad y universalidad del átomo significa que dos relojes atómicos colocados el uno al lado del otro tardarían más de 138 millones de años en descompensarse un segundo a lo sumo. Estos relojes producen algunas de las mediciones más precisas hechas por el hombre. Así que quizá podemos decir que conocemos el tiempo. El problema es que el tiempo no es tan constante como habíamos supuesto. Si dos relojes atómicos se mueven el uno con respecto al otro, entonces, como reveló Einstein a principios del siglo xx y por ello se hizo famoso, pronto estarán ofreciendo versiones muy diferentes del tiempo.

LOS FAROS DE UN TREN

Newton creía que el tiempo y el espacio eran conceptos absolutos en contraste con los cuales podíamos medir cómo nos movemos. En los *Principia* dejó expresada su postura:

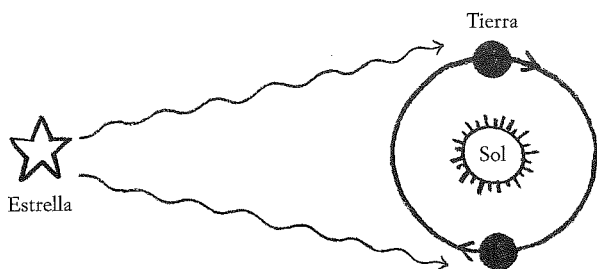
«El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí y por su propia naturaleza, fluye uniformemente sin relación a nada externo».

Para Newton, el tiempo y el espacio eran como el teatro sobre el cual la naturaleza representaba su obra. El espacio era el escenario sobre el que se representaba la historia del universo y el tiempo marcaba las diversas etapas de ésta. Pensaba que se podían colocar relojes repartidos por el universo que, una vez sincronizados, seguirían marcando la misma hora independientemente del lugar en el que se hallaran. Otros no estaban tan convencidos de esto. Gottfried Leibniz, el mayor rival de Newton, creía que el tiempo existía sólo como concepto relativo.

Un descubrimiento realizado en 1887 por los científicos norteamericanos Albert Michelson y Edward Morley inclinó definitivamente la balanza a favor de la visión de Leibniz y contra la de Newton. Estos científicos descubrieron que, independientemente de que nos estemos acercando o alejando de la fuente de luz, la medición de la velocidad de la luz en el vacío será la misma. Esta revelación fue la semilla para el descubrimiento de Einstein de que el tiempo no es algo tan absoluto como Newton había imaginado.

A primera vista, el hecho de que la velocidad de la luz sea la misma independientemente de cómo nos movamos en relación a la fuente de la luz parece contraintuitivo. Consideremos la Tierra orbitando alrededor del Sol. Si medimos la velocidad de la luz procedente de una estrella lejana, es de esperar que resulte más rápida cuando la medimos en un momento en el que nos acercamos a la estrella y más lenta cuando la medimos en un momento en el que nos alejamos de ella.

La física newtoniana implica que si voy corriendo a 10 kilómetros por hora sobre un tren que viaja a 90 kilómetros por hora, para alguien que me ve desde el andén parecerá que estoy moviéndome a una velocidad combinada de 100 kilómetros por hora. Entonces, ¿por qué no pasa lo mismo con



la luz que emite uno de los faros del tren? ¿Por qué la velocidad de esa luz no es 90 kilómetros por hora más rápida para la persona que la mide desde el andén? En el fondo, lo que pasa es que Newton erraba en ambos casos, tanto al determinar la velocidad de la luz como al determinar la velocidad del corredor sobre el tren, desde el punto de vista de la persona que está sobre el andén. No se trata de sumar simplemente a las velocidades la velocidad del tren. El cálculo resulta ser más sutil.

En 1905, al tratar de entender por qué la velocidad de la luz es invariante, Einstein dio con la clave que cambió nuestra percepción del universo. Descubrió que el tiempo y el espacio no son absolutos, sino que varían según el movimiento relativo del observador. Es muy famoso el hecho de que en aquel entonces Einstein trabajaba como empleado en la oficina suiza de patentes, evaluando las aplicaciones de nuevos inventos de lo más diverso, desde distribuidoras de gravilla hasta máquinas de escribir eléctricas. Pero también tuvo que dar su opinión sobre diseños de instrumentos para sincronizar eléctricamente el tiempo, una tarea importante en un mundo que cada vez estaba más interconectado. Fueron estos encargos mundanos los que al parecer inspiraron los experimentos mentales que condujeron a Einstein hasta la teoría de la relatividad especial.

LA FÓRMULA RELATIVISTA PARA COMBINAR VELOCIDADES

Para calcular la velocidad aparente s de un pasajero que corre a u kilómetros por hora sobre un tren que viaja a v kilómetros por hora, Einstein descubrió que es necesario usar la ecuación siguiente:

$$s = \frac{u + v}{1 + (uv/c^2)}$$

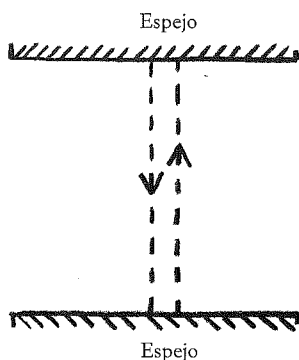
donde c es la velocidad de la luz. Cuando las velocidades u y v son pequeñas comparadas con c , el término uv/c^2 es muy pequeño. Esto significa que la velocidad s puede aproximarse sumando las velocidades $u + v$. Pero cuando las velocidades u y v se aproximan a la velocidad de la luz, la aproximación falla y la fórmula da una respuesta diferente. La fórmula funciona de tal forma que nunca da una velocidad combinada superior a la velocidad de la luz.

RALENTIZANDO EL TIEMPO

Para explicar las nuevas ideas de Einstein sobre el tiempo, necesito un reloj. Un reloj requiere algo que se repita a intervalos regulares. Podría usar uno de los relojes atómicos del Laboratorio Nacional de Física o mi reloj de pulsera, pero de hecho la luz es el mejor reloj para revelar el extraño efecto que el movimiento relativo ejerce sobre el tiempo. Voy a aprovechar el experimento de Michelson y Morley que puso de manifiesto que la velocidad de la luz no parece depender de cómo nos movemos cuando la medimos.

Vamos a considerar que medimos el tiempo con un instrumento en el que cada pulso corresponde a un viaje de ida y vuelta de la luz entre dos espejos.

Colocamos uno de estos relojes en un cohete y dejamos otro con nosotros en la superficie de la Tierra. Como resulta



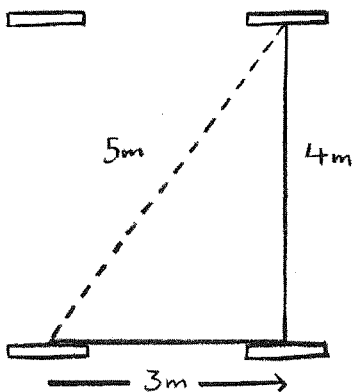
que la distancia en el espacio se contrae en la dirección del movimiento, es preciso colocar el reloj de modo que la luz viaje perpendicularmente a la dirección en la que se mueve el cohete. Esto nos garantizará que la distancia entre los dos espejos es la misma en todo momento. Para mostrar que, desde nuestro punto de vista en la Tierra, el reloj del cohete avanza más lentamente que el reloj de la Tierra, lo más sofisticado que se precisa es el teorema de Pitágoras.

La revelación de Einstein depende del hecho de que la persona de la Tierra ha de tener presente que la luz viaja a la misma velocidad en el cohete que en la Tierra. Éste fue el importante descubrimiento de Michelson y Morley: la velocidad de la luz es la misma en todas partes. Aunque el cohete se esté moviendo, este movimiento no puede incrementar la velocidad de la luz. Para registrar la velocidad, hay que medir la distancia recorrida y dividirla por el tiempo que se tarda en recorrerla (con respecto a los instrumentos de medida que hay en la Tierra). Así que vamos a ver qué distancia recorre la luz cuando rebota entre los dos espejos en el reloj que va en el cohete.

Supongamos que los espejos están separados 4 metros. Supongamos también que durante el tiempo que tarda la luz en viajar entre los dos espejos del cohete, éste se ha desplazado 3 metros según las medidas tomadas desde la Tierra. El

teorema de Pitágoras implica que de hecho la luz ha viajado a lo largo de la hipotenusa del triángulo y ha recorrido por lo tanto 5 metros. Éstas son todas las matemáticas que necesitamos para comprender la teoría de la relatividad especial de Einstein.

A partir de aquí podemos calcular que el cohete viaja a $3/5$ de la velocidad de la luz en relación a la Tierra, ya que el cohete recorre 3 metros en el tiempo que tarda la luz en recorrer 5 metros.

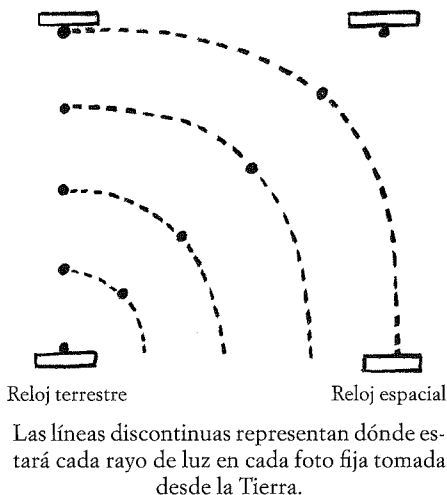


El reloj del cohete se desplaza 3 metros durante el tiempo que tarda la luz en viajar entre los dos espejos, separados por una distancia de 4 metros. Si aplicamos el teorema de Pitágoras, esto significa que la luz ha recorrido 5 metros.

El punto clave es que la luz habrá recorrido la misma distancia en la Tierra, ya que la velocidad de la luz es igual en todas partes. En el reloj de la Tierra, con idénticas medidas, la luz habrá recorrido la misma distancia, o sea, 5 metros. Pero los espejos están separados 4 metros. Esto significa que habrá llegado hasta el espejo de arriba y estará ya de vuelta, con un cuarto del camino ya recorrido de un segundo tictac. Así que el tiempo está pasando más deprisa para la persona

que se queda en la Tierra, porque un tictac del reloj del cohete tarda el mismo tiempo que $1 \frac{1}{4}$ de tictac del reloj de la Tierra. Para la persona que se queda en la Tierra, el reloj del espacio ¡avanza $\frac{4}{5}$ de veces más despacio!

Para hacerse una idea de por qué pasa esto, fijémonos un momento en el rayo de luz que viaja en el cohete y en la Tierra. El rayo de luz viaja a la misma velocidad en el reloj del cohete y en el reloj de la Tierra. Las fotos fijas de la siguiente figura muestran dónde se encontrará la luz en distintos momentos del tiempo. Como la luz del cohete tiene que viajar por el espacio en la dirección del movimiento del cohete, no puede llegar tan lejos en la dirección del espejo que hay enfrente, en el reloj del cohete. Así que desde la perspectiva de la persona en tierra, la luz en su reloj alcanza al espejo antes que la luz del reloj del cohete. Esto significa que el reloj de la Tierra «anda» más deprisa.



En cierto sentido, todo esto está muy bien... pero cuando comparamos los relojes desde el punto de vista de la persona que va en el cohete, las cosas parecen muy contraintui-

tivas. Para comprender por qué las cosas presentan un aspecto raro necesitamos aplicar el llamado «principio de relatividad», según el cual si nos encontramos en movimiento uniforme (o sea, sin acelerar ni cambiar de dirección), es imposible decir si nos movemos o no. Este principio de relatividad no es de Einstein, sino que aparece ya en los *Principia* de Newton, aunque probablemente haya que atribuírselo a Galileo. Capta la extraña experiencia que cualquiera puede haber tenido estando sentado en un tren que se halla aparcado al lado de otro en una estación y el suyo comienza a moverse lentamente. Hasta que aparece el andén en la ventanilla, es imposible saber cuál de los dos trenes se mueve (para que pase esto es necesario que la aceleración sea tan pequeña que resulte imperceptible).

Cuando aplicamos esto a los relojes del espacio y de la Tierra, llegamos a una situación bastante extraña, ya que en lo que respecta al tripulante del cohete, es la Tierra la que ve pasar por delante a $3/5$ de la velocidad de la luz. El mismo análisis que hicimos anteriormente implica que el tripulante del cohete calculará que el reloj de la Tierra es el que va más lento, no su reloj. El tiempo, al parecer, no es un concepto tan obvio como el que experimentamos cada día.

Todo esto es tan raro que resulta increíble. ¿Cómo puede el reloj del cohete ir más despacio que el reloj de la Tierra y al mismo tiempo el reloj de la Tierra ir más despacio que el reloj del cohete? No obstante, una vez que aceptamos la observación indiscutible de que la velocidad de la luz es constante independientemente de cómo la midamos, las matemáticas nos llevan a esta conclusión. Éste es uno de los motivos por los que me gustan las matemáticas. Es como la madriguera del conejo de la lógica que te conduce hasta un inesperado país de las maravillas.

Desde la perspectiva de la Tierra, no es solamente la marcha del reloj en el cohete lo que parece que se ralentiza. Cualquier cosa que dependa del tiempo también se ralentiza. Si

voy sentado en el cohete no puedo reconocer que mi reloj se comporte de manera extraña. Eso significa que todo lo que mide el tiempo resulta afectado del mismo modo, incluidos el cristal de cuarzo que oscila en mi reloj de pulsera, la música de Prokófiev en la radio del cohete, el envejecimiento de mi cuerpo y la actividad neuronal de mi cerebro. A bordo del cohete no seré consciente de que pase nada extraño, porque todo en el cohete estará latiendo al mismo ritmo.

Sin embargo, desde el punto de vista de la Tierra, parecerá que mi reloj está perdiendo tiempo, la música de Prokófiev se habrá convertido en algo parecido a un canto fúnebre, yo estaré envejeciendo más despacio y parecerá que mis neuronas no se activan con la misma frecuencia que siempre. El tiempo y la sensación del paso del tiempo son relativos. Dependen de comparar cosas. Si todo se ralentiza o se acelera a la vez, no podemos notar ninguna diferencia. Todo parecerá normal a bordo del cohete. Lo curioso es que cuando mire hacia la Tierra, veré que todo se mueve a la velocidad del caracol.

DATE PRISA Y VIVIRÁS MÁS

Un ejemplo bastante sorprendente de esta diferencia relativa en el paso del tiempo es el extraño caso de la desintegración del muón que vimos en la segunda «frontera». Cuando los rayos cósmicos chocan contra las capas altas de la atmósfera, las colisiones crean una lluvia de partículas fundamentales, que incluyen el muón, una versión pesada del electrón. Estos muones no son estables y se desintegran muy rápidamente en formas más estables de materia.

Los científicos hablan de un concepto que llaman vida media. Es la cantidad de tiempo que ha de pasar para que el total de muones se reduzca a la mitad por efecto de la desintegración. (Saber, sin embargo, cuándo una partícula concreta se va a desintegrar es todavía un misterio y, como discutí en la tercera «frontera», solamente disponemos de un meca-

nismo del estilo del lanzamiento de un dado para conseguir algún poder predictivo). En el caso de los muones, después de 2,2 microsegundos, de media la mitad de estas partículas se habrán desintegrado.

La velocidad a la que se desintegran debería implicar que, dada la distancia que tienen que recorrer hasta alcanzar la superficie de la Tierra, muy pocas de ellas sobrevivirán al viaje. Sin embargo, los científicos detectaron muchos más muones de los previstos. La explicación es que un reloj que viaje en el muón avanza muy despacio, porque estas partículas se desplazan a una velocidad próxima a la de la luz. Así que la vida media del muón es de hecho más larga de lo esperado, teniendo en cuenta las mediciones hechas con un reloj en la Tierra. El reloj interno del muón va más despacio que el reloj de la Tierra, y por lo tanto los 2,2 microsegundos que tardan en desintegrarse la mitad de los muones duran mucho más de 2,2 microsegundos cuando se miden con el reloj de la Tierra.

Pero ¿y desde el punto de vista del muón? Para el muón, su reloj funciona a un ritmo normal, y es el de la Tierra el que va despacio. Así que, desde su punto de vista, ¿qué hace que haya más muones de los esperados que llegan hasta la superficie de la Tierra? La clave está en que no solamente el tiempo sino también el espacio resulta afectado cuando las cosas se mueven unas respecto a las otras. El espacio que hay entre el planeta y los muones también resulta afectado. Las distancias se encogen cuando se mueven, de modo que la distancia desde las altas capas de la atmósfera y la superficie de la Tierra es mucho más corta desde la perspectiva de los muones que desde la nuestra. Así que el muón no piensa que la superficie de la Tierra esté tan lejos, y como resultado, muchos más de los esperados alcanzan su destino.

¿Podría usar esta estrategia para robar unos días más a mi vida finita? ¿Podría engañar a mi propia vida media? El problema es que, como ya he explicado, todo se ralentiza sobre

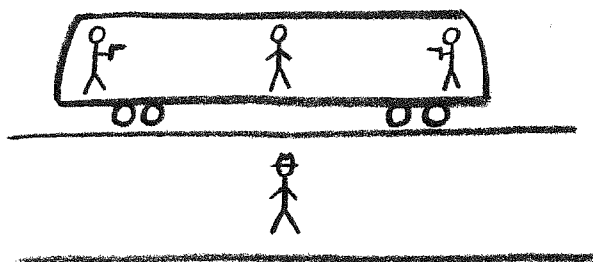
el cohete en movimiento. Viajando a una velocidad próxima a la de la luz no voy a poder exprimirle un poco más de tiempo al universo para resolver los problemas matemáticos en los que estoy trabajando, porque, si bien mi cuerpo envejecería más despacio, mis neuronas también se activarían a un ritmo más lento. El principio de la relatividad significa que, por lo que a mí respecta, yo estaría en reposo mientras que todo lo demás se aceleraría.

PERROS DE LA RELATIVIDAD

Las ideas concebidas por Einstein en 1905 revelan que el tiempo que vemos en nuestros relojes es mucho más escurridizo de lo que puede parecer a primera vista. La naturaleza absoluta del tiempo en el universo sufre nuevos desafíos cuando tratamos de entender qué significa que dos sucesos son simultáneos. Éste es el problema al que Einstein tuvo que enfrentarse al evaluar patentes de aparatos para sincronizar el tiempo. Resulta que como pregunta no tiene sentido. O al menos, la respuesta depende del sistema de referencia.

Empecemos por una escena de una película imaginaria titulada *Perros de la relatividad* en homenaje a la de Tarantino *Reservoir Dogs* o *Perros de la calle*. Su acción transcurre en un tren (como muchas cosas de la relatividad). Dos delincuentes con pistolas idénticas se hallan en ambos extremos del tren. Exactamente a mitad de camino entre ellos se encuentra otro de los miembros de la banda. El tren atraviesa una estación sin detenerse. Un policía ve la escena desde el andén. Consideremos primero la situación desde el tren. Por lo que respecta a los miembros de la banda, se puede suponer que el tren está en reposo. Las pistolas disparan. Las balas alcanzan al hombre que está en medio al mismo tiempo. La velocidad de las balas y la distancia que tienen que recorrer son las mismas, y desde el punto de vista de las personas que van en el tren, ambos pistoleros disparan a la vez. De hecho, la

víctima ve los fogonazos de ambas pistolas a la vez, un momento antes de ser alcanzado por las balas.



Pero ¿qué pasa desde el punto de vista del policía? Supongamos que la víctima pasa por delante del policía precisamente en el momento en el que los dos fogonazos de luz llegan a la víctima, de modo que el policía ve los dos fogonazos al mismo tiempo también. Pero entonces se pregunta: ¿cuánto ha viajado la luz? Aunque ambas pistolas están ahora a la misma distancia de él, cuando se dispararon, la pistola de la parte delantera del tren estaba de hecho más cerca de él. Así que la luz tuvo que recorrer para llegar hasta él un espacio menor que la luz proveniente de la pistola de la parte trasera del tren. En cuyo caso, como la velocidad de la luz es constante, si la luz llegó al mismo tiempo, tiene que haber salido de la pistola de la parte trasera del tren antes que de la pistola de la parte delantera del tren. Así que, desde el punto de vista del policía, parece que el criminal de la parte trasera del tren disparó antes. Pero si colocamos otro policía en otro tren que se mueve en dirección contraria, se puede dar la vuelta a todo el argumento y entonces el segundo policía concluirá que la pistola de la parte delantera del tren ha sido la primera en disparar.

Entonces, ¿quién disparó primero? Desde el punto de vista del policía del andén, el pistolero de la parte trasera del tren disparó el primero; pero desde el punto de vista del po-

licía del tren que venía en dirección contraria, fue el pistolero de la parte delantera del tren quien disparó el primero. Por lo tanto, hablar de qué pistola disparó primero carece de sentido desde un punto de vista absoluto. El tiempo asume diferentes significados en diferentes marcos de referencia. Resulta que sí que hay algo absoluto para todos los observadores, pero es preciso combinar espacio y tiempo.

El problema es que hemos intentado medir la distancia entre dos objetos, y ésta cambia según me muevo en relación a los dos puntos. Análogamente, el tiempo entre dos sucesos también cambia. Pero si definimos una nueva distancia que mide la distancia en tiempo y en espacio, se obtiene algo invariante, o sea, que no depende de quién esté haciendo la medición. Ésta fue la gran idea del matemático Hermann Minkowski, antiguo profesor de Einstein en la Escuela Politécnica de Zúrich. Al oír hablar de las ideas de Einstein, comprendió inmediatamente que las geometrías de dimensión superior descubiertas por el matemático alemán Bernhard Riemann cincuenta años antes eran el marco perfecto para la teoría de Einstein.

Para aquellos que se alegran contemplando una fórmula, la distancia entre un suceso que ocurre en el punto (x_1, y_1, z_1) en el momento t_1 y un suceso que ocurre en el punto (x_2, y_2, z_2) en el momento t_2 está definida por

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2 (t_1 - t_2)^2}$$

Los tres primeros sumandos de la ecuación

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2$$

nos dan la distancia usual medida en el espacio (usando el teorema de Pitágoras). El último sumando es la medida usual de la diferencia en el tiempo. Nuestra primera intuición sería sumar estas dos distancias sin más. El paso inteligente que

Minkowski dio fue mantenerlas separadas. Esto crea un tipo de medida muy diferente, que conduce a una geometría que no satisface las leyes usuales de la geometría tal y como fue desarrollada por los griegos. Contempla el universo no como un espacio tridimensional animado en el tiempo, sino más bien como un bloque tetradimensional de algo llamado espacio-tiempo, cuyos puntos están localizados mediante cuatro coordenadas (x, y, z, t) , tres para el espacio y una para el tiempo. Minkowski introdujo este modo geométrico nuevo de mirar el universo dos años después de que Einstein anunciara su teoría especial de la relatividad en 1905.

Si la fórmula le deja al lector algo frío, que no se desespere. Einstein también se mostró bastante reticente ante lo que consideró una especie de truco matemático. Pero la geometría tetradimensional de Minkowski proporcionó un nuevo mapa del universo. Como declaró Minkowski: «A partir de ahora, el espacio por sí solo y el tiempo por sí solo están destinados a desdibujarse y a desvanecerse en las sombras, y solamente una especie de unión entre los dos conservará una realidad independiente».

Ésta fue la respuesta de Einstein a la traducción matemática de sus ideas: «Desde que los matemáticos se abalanzaron sobre la teoría de la relatividad, ni yo mismo la entiendo». Pero pronto se dio cuenta de que era el mejor lenguaje para desenvolverse en este nuevo universo extraño del espacio-tiempo.

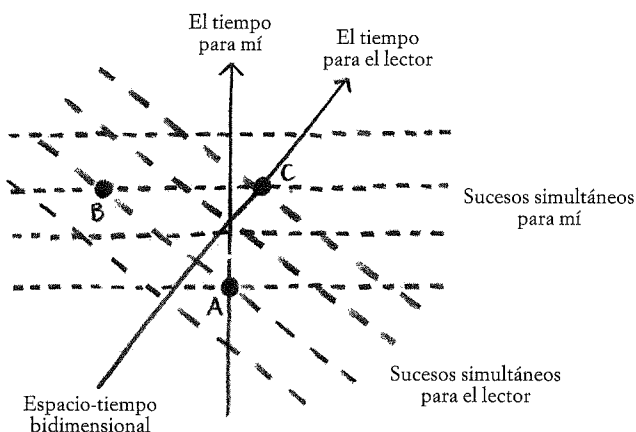
El poder del concepto de distancia en el espacio-tiempo reside en el hecho de que esta nueva distancia entre sucesos, que conjuga entre sí el espacio y el tiempo, es siempre la misma para dos observadores cualesquiera, independientemente de cómo se muevan. Así que Newton tenía razón cuando dijo que debía haber algo que fuera absoluto. Su error fue considerar el espacio y el tiempo como entes independientes. Después de Einstein, hemos de considerarlos simultáneamente. Y es esta mezcla de la naturaleza del espacio y del

tiempo lo que hace realmente interesante la cuestión de lo que pasó antes de la Gran Explosión.

Para empezar, nos obliga a considerar el tiempo desde una perspectiva muy diferente. Debemos considerar el universo como un bloque de espacio y tiempo en el que las ideas de un «antes» y un «después» son tan cuestionables como decir qué punto del espacio está delante de otro: depende de la perspectiva. Esto es muy desconcertante. Para los dos policías de la escena de mi película imaginaria, hay un momento en el que uno de los pistoleros todavía no ha apretado el gatillo. Quizá está a tiempo de detenerse, reconsiderar su intención y decidir no disparar, haciendo que solamente el otro pistolero sea responsable de lo que ocurra. Pero ¡un momento! Para el policía del andén esa decisión está en manos del hombre que va en la parte delantera del tren, mientras que para el policía del tren que viene en sentido contrario, dicha decisión está en manos del pistolero que va en la parte trasera del tren. ¿Significa esto que el futuro realmente no está de ninguna manera en nuestras manos?

Normalmente, cuando dibujamos una gráfica que expresa la distancia en función del tiempo, el eje del tiempo se representa en horizontal, y la distancia, la recorrida por ejemplo por una pelota, en vertical. Pero el espacio-tiempo no nos permite dividir el espacio y el tiempo de un modo tan nítido. Cuando imaginamos el espacio-tiempo en bloque, hemos de ser cuidadosos y no pensar en que hay en el bloque una dirección privilegiada que representa el tiempo y otras tres direcciones independientes que controlan el espacio. Dos direcciones diferentes en este espacio-tiempo pueden representar ambas la dimensión del tiempo. Depende precisamente de cómo nos movemos en el espacio. El tiempo y el espacio están mezclados en esta nueva visión de los mismos.

Éste es un auténtico desafío para mi intuición sobre el universo. Supongamos que me alejo en un cohete a toda velocidad de una persona que se queda en la Tierra. Si dibujo una



En la línea de tiempo del lector, los sucesos A y B ocurren simultáneamente y C ocurre después. Sin embargo, para mí, B y C son sucesos simultáneos, mientras que A ocurrió antes. Si A y C tienen un vínculo de causa-efecto, entonces en la línea de tiempo de ambos A siempre ocurrirá antes que C. Pero B no tiene vínculo causal ni con A ni con C, así que hay líneas del tiempo que colocan el suceso B antes que el A, o alternatively, después del C.

línea que conecta todos los sucesos que son simultáneos desde mi punto de vista en esta geometría del espacio-tiempo, el conjunto de líneas será muy diferente al obtenido por la persona que se quedó en la Tierra.

En hindi y en urdu la palabra *kal* significa tanto 'ayer' como 'mañana'. En la cita del libro *Hijos de la medianoche* que encabeza este capítulo, Salman Rushdie comenta con gracia que de la gente que tiene la misma palabra para expresar ayer y mañana no puede decirse que posea un control muy firme del tiempo. Pero ¿no habrá algo más significativo detrás? La idea de un «antes» o un «después» no está tan clara como algunas lenguas presuponen.

Y sin embargo, incluso en esta fusión de espacio y tiempo, el tiempo conserva un rasgo que lo distingue del espacio. La información no puede viajar más rápida que la luz. La relación causa-efecto significa que no podemos colocarnos en

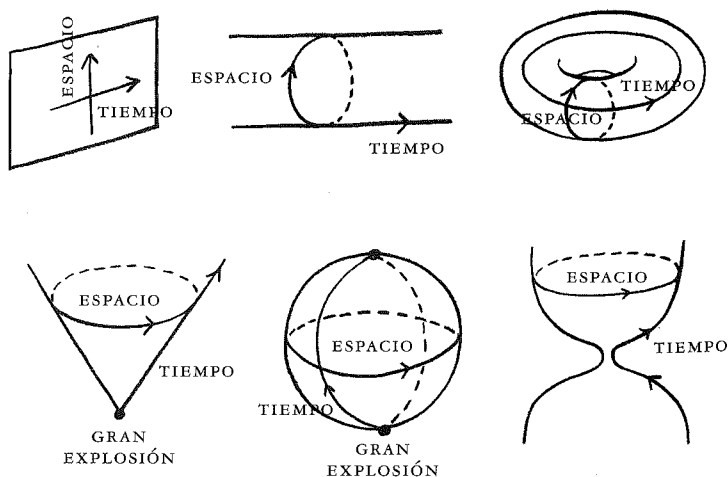
un punto del espacio-tiempo en el que la bala alcance a la víctima antes de ser disparada. Hay limitaciones a la hora de dibujar estas líneas de tiempo en el espacio-tiempo. Nuestra intuición sobre el espacio y el tiempo no nos va a ayudar. Como Einstein admitió a regañadientes, habrá que fiarse de las matemáticas para que nos lleven hasta los límites del universo y del conocimiento.

LA FORMA DEL TIEMPO

Igual que podemos hablar de que el espacio posee cierta forma, también podemos hablar de que el espacio-tiempo tiene una forma dada. Mi instinto inicial es pensar en el tiempo como una línea, lo que hace que resulte muy difícil imaginar algo que no sea un segmento finito, con un comienzo, por lo tanto, o una línea infinita. Pero hay otras posibilidades. Como el espacio y el tiempo tienen cuatro dimensiones, debemos considerar formas que no podemos ver. Precisamos las matemáticas para describirlas. Pero podemos dibujar formas que representan trozos del espacio-tiempo y que nos capacitan para comprender el significado de la pregunta: ¿qué pasó antes de la Gran Explosión? Por ejemplo, imaginemos que hubiera solamente una dimensión espacial, de modo que el espacio-tiempo fuera bidimensional. Esto crea una superficie que podemos ver, como una lámina de goma con la que podemos jugar y disponer de un modo u otro, según nos parezca interesante.

Creo que el modelo del espacio-tiempo bidimensional sería para la mayoría de las personas una lámina plana infinita con el tiempo extendiéndose infinitamente hacia delante y hacia atrás, y el espacio también unidimensional e infinito. Pero, como exploramos en la última «frontera», el espacio podía ser finito. Podríamos cerrar el espacio sobre sí mismo para crear una circunferencia y luego hacer que el tiempo desplace esta circunferencia, con lo cual el espacio-tiempo presen-

taría el aspecto de un cilindro. Podríamos también pegar entre sí las dos circunferencias de los extremos del cilindro para construir una rosquilla, o sea, un espacio-tiempo en forma de toro. Esto haría el tiempo finito también. En este modelo de espacio-tiempo, podríamos dar una vuelta entera sobre la superficie y volver a un momento previo de la historia. El lógico Kurt Gödel propuso soluciones de las ecuaciones de Einstein de la relatividad general que tienen esta propiedad. Gödel, como explicaré en la «frontera» final, disfrutaba mucho confundiendo las expectativas lógicas de las personas. Pero los círculos del espacio-tiempo de Gödel son considerados generalmente como meras curiosidades, porque volver atrás en el tiempo causa demasiados problemas a la hora de considerar las relaciones causa-efecto.



Posibles formas para un espacio-tiempo bidimensional.

Para conseguir una representación más realista del espacio-tiempo, necesitamos crear una geometría que tenga en cuenta nuestro modelo actual de la historia del universo, que incluye un comienzo: la Gran Explosión. Para ver este

punto en nuestro universo espacio-tiempo bidimensional, podríamos replegar la superficie sobre sí misma de modo que semeje un cono. El universo, que es justamente una circunferencia, va adelgazándose según volvemos atrás en el tiempo, hasta que queda reducida a un punto al llegar al vértice del cono. Aquí es donde empieza el tiempo. Antes de eso no hay nada. Ni espacio, ni tiempo. Solamente un punto con densidad infinita. Éste es un buen modelo para algo como la Gran Explosión.

O bien, en vez de quedar el espacio-tiempo colapsado en un punto, podría ser como una esfera, como la superficie de la Tierra. Esto tiene sus propias implicaciones cuando se trata de responder la pregunta: ¿qué pasó antes de la Gran Explosión? Si nos dirigimos al sur siguiendo una línea de longitud, al llegar al Polo Sur pasamos de golpe a otra línea de longitud que nace al otro lado. Pero éstos son solamente números con los que marcamos algunos puntos de la superficie de la Tierra. En realidad no representan un cambio discontinuo en la forma, sino simplemente un salto en la manera de medir que hemos elegido.

De modo que, cambiando de coordenadas, lo que parecía ser un punto singular se presenta como un punto igual de liso que los otros. Ésta es una de las ideas de Hawking sobre el tiempo. Quizá deberíamos tratar de sumergir el espacio-tiempo en una forma tal que este punto que parece señalar que el tiempo se detiene sea de hecho como el Polo Sur de la esfera. Al fin y al cabo, ¿qué hay al sur del Polo Sur? En realidad, la pregunta no tiene sentido.

Sorprende que, con cierta frecuencia, al surgir una pregunta a la que aparentemente es imposible responder, tengamos que terminar aceptando que la pregunta no está bien planteada. El principio de incertidumbre de Heisenberg de hecho no implica que no podamos conocer simultáneamente el momento y la posición de una partícula, sino más bien que las dos no existen a la vez. Análogamente, se han hecho

intentos para probar que la pregunta «¿Qué pasó antes de la Gran Explosión?» no es de las imposibles de contestar, sino más bien que no tiene sentido. Hablar de un «antes» supone la existencia del tiempo, pero ¿qué pasa si el tiempo empezó a existir solamente después de la Gran Explosión?

Al dibujar la forma del espacio-tiempo he empezado a entender un poco por qué muchos científicos han zanjado la cuestión de comprender el tiempo antes de la Gran Explosión diciendo que no tiene sentido. Pero hay otras formas que permiten al tiempo contar con una historia anterior a la Gran Explosión. ¿Qué pasaría si el cono, en vez de llegar hasta un punto y terminar, vuelve de hecho a nacer al otro lado, representando un universo que se contraía antes de la Gran Explosión? Para hacerse realmente una idea de la historia del tiempo cuando vamos hacia atrás, hacia la Gran Explosión, necesitamos entender qué le ocurre al tiempo al aproximarse a un punto con más gravedad. Éste fue el segundo gran descubrimiento de Einstein: que la gravedad también influye en la marcha del tiempo.

POR QUÉ LOS RASCACIELOS NO NOS CONVIENEN

El segundo asalto de Einstein contra la naturaleza del tiempo se produjo cuando añadió la gravedad a la mezcla. Su teoría general de la relatividad, desarrollada entre 1907 y 1915, describe la auténtica naturaleza geométrica de la gravedad. La gravedad no es realmente una fuerza, sino una propiedad de la manera de curvarse la hoja tetradimensional del espacio-tiempo. La Luna orbita en torno a la Tierra porque la masa de la Tierra distorsiona la forma del espacio-tiempo de tal modo que la Luna simplemente rueda sobre la forma curva del espacio-tiempo en esta zona. La fuerza de la gravedad es una ilusión. No existe. Lo único que hacen los objetos es caer libremente por la geometría del espacio-tiempo,

y lo que observamos es la curvatura de este espacio. Pero si los cuerpos con masa pueden distorsionar la forma del espacio, también pueden tener el mismo efecto sobre el tiempo.

Ésta fue una de las mayores revelaciones de Einstein, y se basa una vez más en un principio de equivalencia. Las extrañas consecuencias de la relatividad especial nacen del principio de relatividad, que afirma que es imposible decir si somos nosotros los que nos movemos o es nuestro entorno lo que se mueve. Einstein aplicó un principio de equivalencia parecido a la gravedad y la aceleración.

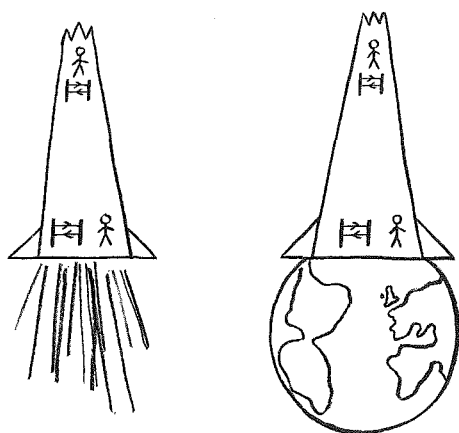
Si nos encontramos flotando en el espacio dentro de un cohete sin ventanas y colocamos un planeta con una gran masa debajo de la aeronave, sentiremos una fuerza que nos atrae hacia el suelo. Es la fuerza de la gravedad. Pero si en vez de esto, lo que hacemos es acelerar el cohete hacia arriba, experimentaremos exactamente la misma sensación de ser atraídos hacia el suelo. La hipótesis de Einstein fue que no hay modo de distinguir entre las dos sensaciones: la gravedad y la aceleración producen los mismos efectos.

Esto es especialmente sorprendente si lo aplicamos al reloj de fotones dentro del cohete. Supongamos que nuestro cohete es tan alto como el rascacielos Shard de Londres. Colocamos un reloj de fotones en el suelo del cohete y otro en su cúspide. Junto a cada uno de los relojes situaremos un astronauta, que nos ayudará a comparar el funcionamiento de los dos instrumentos.

A cada tictac de su reloj, el astronauta que está en el suelo del cohete enviará un pulso de luz al que está en lo alto. El astronauta de arriba puede entonces comparar la llegada de estos pulsos con el tictac de su propio reloj. Si no hay aceleración ni gravedad, la llegada de los pulsos y el ritmo del tictac de ambos relojes estarán sincronizados. Sin embargo, vamos a acelerar el cohete en la dirección de su cúspide: ahora, al emitir un pulso en el suelo del cohete, la luz deberá recorrer un espacio mayor, con lo que los pulsos tardarán

cada vez más en alcanzar la cúspide y el astronauta de arriba los recibirá a un ritmo más lento. Esto es parecido al efecto Doppler que experimentamos con el sonido: al alejarnos de la fuente del sonido, la frecuencia disminuye y el sonido que llega es más grave. Pero en este caso es importante señalar que el cohete se aleja acelerándose y que no vuela a una velocidad constante sin más.

No obstante, la interpretación de la disminución de la frecuencia es que el reloj del suelo del cohete funciona más despacio que el reloj de arriba. ¿Qué pasa si programamos de otro modo el experimento y hacemos que sea el astronauta que está en la cúspide el que envíe los pulsos hacia el suelo del cohete? Como el astronauta del suelo se mueve aceleradamente hacia los pulsos, los recibirá a un ritmo más rápido que los que antes enviaba. De modo que confirmará que su reloj está funcionando a un ritmo más lento que el que está arriba. Esto contrasta con el caso de dos relojes que se alejen el uno del otro a velocidad constante, ya que en este caso ambos astronautas pensarán que su reloj va más deprisa.



La aceleración y la gravedad tienen el mismo efecto: ralentizan ambos al reloj colocado en el suelo del cohete Shard.

La conclusión interesante del experimento surge cuando sustituimos la aceleración por la gravedad. Según el principio de equivalencia de Einstein, sea cual sea el efecto que la aceleración del cohete pueda tener sobre los relojes, el efecto de la gravedad ha de ser el mismo. Así que cuando coloquemos un planeta grande en la base de nuestro cohete con el tamaño del Shard, el impacto será el mismo que cuando el cohete se alejaba aceleradamente: los relojes avanzan más despacio en la base del Shard que en el último piso del mismo.

Como el cuerpo que envejece es una especie de reloj, esto significa que envejecemos más despacio cuanto más cerca estamos del centro de la Tierra: la gente que trabaja en el último piso del Shard envejece más deprisa que la gente que trabaja en la planta baja. Por supuesto, la diferencia de velocidad entre ambos relojes es sumamente pequeña a esta escala, pero se convierte en una diferencia significativa si comparamos la marcha de los relojes atómicos que hay en la superficie de la Tierra con los que funcionan en los satélites en órbita. La diferencia entre la gravedad que afecta a ambos relojes hace que funcionen a un ritmo distinto. Como estos relojes atómicos son fundamentales para el funcionamiento del GPS, es esencial tener en cuenta los efectos de la gravedad sobre el tiempo para que estos sistemas sean precisos.

GEMELAS ASIMÉTRICAS

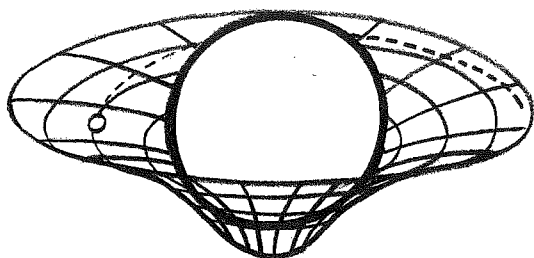
Hay una historia clásica que revela la extraña naturaleza del nuevo mundo de Einstein. Consiste en enviar dos gemelos, o en realidad solamente uno de ellos, a viajar por el espacio. Este ejemplo me gusta mucho, porque yo tengo dos hijas que son gemelas idénticas, Magaly e Ina. Si envío a Ina al espacio en un cohete que se desplaza casi a la velocidad de la luz y luego la traigo de vuelta a la Tierra, la física de la relatividad implica que, aunque ella piense que ha estado fuera sola-

mente diez años, el reloj de su hermana gemela en la Tierra se habrá adelantado, de modo que ahora Magaly tendrá ochenta años.

Para entender verdaderamente la naturaleza asimétrica de esta historia, es preciso tener en cuenta la revelación de Einstein sobre el efecto de la gravedad y la aceleración sobre el tiempo. Una vez que Ina esté viajando a una velocidad constante próxima a la de la luz, la primera revelación de Einstein dice que ninguna de las gemelas puede saber cuál de ellas se mueve y cuál está en reposo. Ina pensará que el reloj de Magaly avanza más despacio, mientras que Magaly pensará lo mismo del de Ina. Entonces, ¿por qué Ina vuelve más joven? ¿Por qué no tienen al regreso la misma edad?

Ina regresa más joven porque debe acelerarse para llegar a su velocidad constante. Análogamente, a la vuelta tiene que decelerarse, que es lo mismo que acelerarse en sentido contrario. Esto hace que su reloj se ralentice en relación con el reloj que se quedó con su hermana gemela en la Tierra, que no se ha acelerado en ningún momento. Esta asimetría hace que Ina vea a Magaly en el futuro. Si envío a ambas gemelas en cohetes que viajen en sentido contrario y luego las traigo de vuelta a la Tierra, tendrán ambas la misma edad, mientras que todos los que nos quedamos en la Tierra habremos envejecido más rápido.

La teoría de la relatividad general de Einstein reveló que el tiempo y el espacio sufren un empuje al aproximarse a una masa. La gravedad es de hecho la distorsión de la superficie de este espacio-tiempo. Si algo tiene masa, deforma dicha superficie. La manera clásica de imaginar esto es considerar el espacio-tiempo como una superficie bidimensional, y el efecto de la masa el que produciría colocar una bola sobre esta superficie. La bola deforma la superficie hacia abajo, creando una sima. La gravedad puede interpretarse como la tendencia natural que tienen las cosas a caerse en esa sima al acercarse a ella.



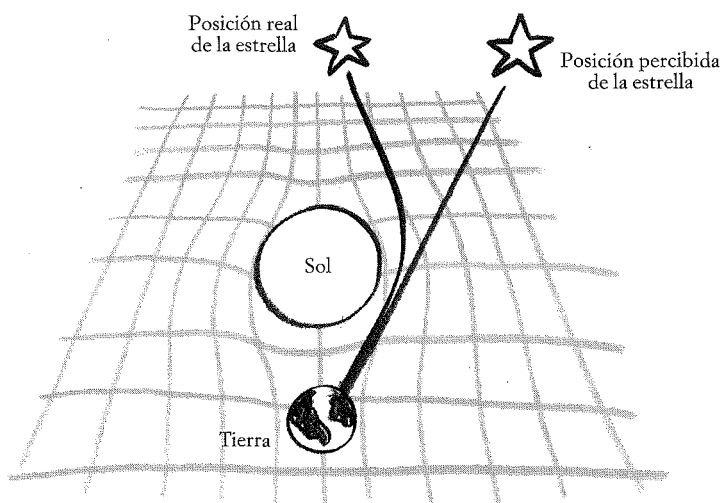
Esta distorsión del espacio-tiempo tiene un efecto interesante sobre la luz. La luz sigue el camino más corto entre dos puntos, que es la definición de una línea «recta». Pero ahora estamos hablando de líneas en el espacio-tiempo, en el que las distancias se calculan usando la fórmula de Minkowski, que incluye las coordenadas del espacio-tiempo. Extrañamente, al usar la fórmula de Minkowski, resulta que la distancia entre dos puntos del espacio-tiempo se reduce si la luz tarda más en llegar a uno a partir del otro.

Así que para encontrar el camino más corto en el espacio-tiempo, la luz seguirá una trayectoria que trata de hallar un equilibrio minimizando la distancia que debe recorrer y maximizando el tiempo empleado en hacerlo. Siguiendo una trayectoria tal que la partícula de luz esté esencialmente en caída libre, los relojes que van a bordo de la partícula irían más deprisa. Pero la presencia de la gravedad es equivalente a una aceleración y esto hace que el reloj se ralentice. Así que la teoría de Einstein predecía que la luz sufriría un desvío ante la presencia de una masa grande. Era una predicción de la teoría bastante inesperada, pero tenía la ventaja de que podía comprobarse: un escenario perfecto para una teoría científica.

Las observaciones de la luz proveniente de lejanas estrellas realizadas por el astrónomo británico Arthur Eddington durante el eclipse solar de 1919 fueron las que proporcionaron pruebas convincentes de este tipo de curvatura del espacio-tiempo. La teoría predecía que la luz de las estrellas

lejanas sería desviada por el efecto gravitatorio del Sol. Eddington necesitaba el eclipse para atenuar el brillo del Sol y poder así ver las estrellas en el cielo. El hecho de que la luz efectivamente parece desviarse al pasar cerca de objetos con mucha masa confirmó que los caminos más cortos no eran líneas rectas euclídeas, sino líneas curvas.

Experimentamos el mismo efecto en la superficie de la Tierra. Un avión que vuela de Londres a Nueva York sigue una trayectoria curva que pasa por encima de Groenlandia y no la línea recta que uno esperaría al ver un mapa plano de la Tierra. Esa línea curva es el camino más corto entre esos dos puntos sobre la superficie de la Tierra. La luz también buscó el camino más corto desde la estrella hasta el telescopio de Eddington en la Tierra.



Eddington anunció la prueba experimental que confirmaba las ideas de Einstein el 6 de noviembre de 1919. A los pocos días, los titulares de los periódicos de todo el mundo pregonaban a bombo y platillo el gran logro: «LA TEORÍA DE

EINSTEIN TRIUNFA: las estrellas no están donde parecía, pero que nadie se alarme», se leía en el *New York Times*; «Revolución en la ciencia», declaró el *Times* de Londres. Aunque estamos ya muy acostumbrados a que aparezcan el bosón de Higgs o las ondas gravitatorias en los titulares periodísticos, ésta fue probablemente la primera vez en la historia en que se le dio tanta publicidad a un logro científico. Saludado por los periodistas como el nuevo Newton, el desconocido Einstein fue catapultado a la fama a los cuarenta años de edad.

Si el lector siente que todas estas deformaciones del espacio y del tiempo son tremendamente endiabladas para su cerebro, que no se desespere. Está en buena compañía. Después de que Eddington anunciase su descubrimiento de que la luz se desvía, un colega vino a felicitarle: «Usted debe de ser una de las tres personas que hay en el mundo que comprende la teoría de Einstein». Eddington no supo qué responderle, y el colega prosiguió: «Vamos, vamos, que no hay motivo para ser tan modesto». «No, no es eso», replicó Eddington, «estaba pensando en quién podría ser el tercero».

Sin embargo, tratar de explicar qué pasa con el tiempo cuando nos remontamos hasta la Gran Explosión pondría a prueba incluso la capacidad de Eddington para comprender la teoría de Einstein.

Hay un lugar donde el tiempo está detenido. Las gotas de lluvia cuelgan en el aire, inmóviles. Los péndulos de los relojes quedan suspendidos en algún punto de su recorrido. Los perros alzan el hocico y ladran en silencio. Los peatones están congelados en las calles polvorientas, las piernas levantadas como sostenidas por hilos. El aroma de los dátiles y los mangos, el coriandro y el comino flota en el espacio.

ALAN LIGHTMAN, *Sueños de Einstein*

Me gusta bastante el diseño de mi reloj. El cristal consiste simplemente en un cuadrado marrón inscrito en una caja circular de plata. Me gusta la simetría de esta forma, y sin embargo, hay una tensión sutil entre el cuadrado y el círculo. No es muy caro, lo cual está bien, porque tengo tendencia a perder los relojes.

Mi último reloj se me escurrió de la muñeca cuando estaba haciendo kayak en un lago cerca del glaciar neozelandés del monte Cook. Intenté recuperarlo, pero el agua estaba tan horriblemente fría que no resistí con la mano sumergida mucho más de dos segundos. No tenía otro medio para medir el tiempo en esas circunstancias. El reloj había desaparecido bajo la superficie del agua y su mecanismo estará ya seguramente oxidado y congelado, su relato del tiempo detenido por las aguas glaciales que fluyen de la citada montaña.

Si quisiera un entorno apropiado para congelar el tictac de mi reloj actual, sumergirlo en una de las singularidades matemáticas que fueron descubiertas en las ecuaciones de Einstein para la relatividad general detendría no sólo mi reloj, sino también el más resistente que uno pudiera imaginar.

Sin embargo, necesitaría un cohete y no un kayak para explorar esas singularidades, conocidas como agujeros negros.

HORIZONTES MÁS ALLÁ DE LOS CUALES NO PODEMOS VER

La razón por la que el universo es tan fascinante—y no una simple extensión uniforme de materia—es que, gracias a la gravedad, unos átomos atraen a otros átomos. Y así, a menos que todo esté en perfecto equilibrio, vemos movimientos de materia que se siente atraída por otras porciones de materia. Pero lo interesante de la gravedad es que la atracción que la materia ejerce sobre la materia se hace más fuerte cuando las cosas se acercan. Esta atracción es la que conduce a la creación de estrellas como nuestro Sol, pero también a otros sucesos más catastróficos en el espacio-tiempo.

El átomo más sencillo es el de hidrógeno, que está compuesto por un electrón y un protón unidos por la fuerza electromagnética. Si tenemos dos átomos de hidrógeno, el uno es atraído por el otro en virtud de la fuerza de la gravedad. Y según los átomos se aproximan unos a otros, empiezan a chocar entre sí. Si aumentamos el número de átomos de hidrógeno, los choques serán cada vez más enérgicos hasta que los átomos no se limitarán a rebotar los unos contra los otros, sino que se darán las condiciones para la fusión nuclear y tendremos una estrella. Los átomos de hidrógeno se fusionan para producir átomos de helio. En este proceso se libera energía, creando una presión hacia fuera a medida que esa energía se va disipando. Ésta es la energía de la que dependemos para mantener la vida en la Tierra. La estrella permanece estable, sin colapsarse más, porque la atracción gravitatoria hacia adentro se ve contrarrestada por la presión hacia fuera que genera la energía liberada en el proceso de fusión.

Llegará un momento en el que todo el hidrógeno se habrá gastado. Algunas estrellas seguirán fusionando helio y pro-

duciendo así otros átomos de la tabla periódica. Muchos de los átomos que encontramos en la Tierra, como el hierro, el oxígeno o incluso el carbono que es crucial para la vida, son todos productos de esta fusión continua de átomos más ligeros en las estrellas. Finalmente la estrella será incapaz de mantener esta fusión: se le habrá acabado el combustible. Y entonces, de nuevo, la gravedad recupera el protagonismo, y al contraerse la estrella, la física cuántica entra en acción. Si confinamos a las partículas en un espacio cada vez más pequeño, sabremos mucho sobre su posición. Por el principio de incertidumbre de Heisenberg, esto tiene que compensarse con una gran incertidumbre en lo que respecta a la velocidad de las partículas. El movimiento de repulsión entre las partículas produce un segundo período de estabilidad que contrarresta la atracción de la gravedad, creando lo que se conoce como una enana blanca.

No obstante, en 1930 el físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar detectó un problema. Confinado en el barco que lo llevaba a Cambridge para iniciar su doctorado, Chandrasekhar se dio cuenta de que la relatividad especial impone una velocidad límite para el movimiento de estas partículas. De modo que, si la masa de la estrella es suficientemente grande, la gravedad superará a esa velocidad límite y la estrella se seguirá colapsando, creando una región del espacio de densidad cada vez mayor. Los cálculos que hizo a bordo del barco revelaron que cualquier estrella que tuviera una masa superior a 1,4 veces la de nuestro sol sufriría ese destino. Las supernovas responsables de la creación de elementos como el oro y el uranio son el resultado de estos colapsos cataclísmicos.

El espacio cercano a uno de estos puntos de alta densidad se verá fuertemente curvado, tanto que la luz que pase cerca quedará atrapada para siempre. Una manera de hacerse una idea de cómo podrían quedar atrapadas las cosas es imaginar que lanzamos una pelota al aire. Sobre la superficie de

la Tierra es posible lanzar una pelota al aire con la velocidad suficiente para que escape de la atracción gravitatoria de la Tierra. La velocidad a la que hay que lanzar la pelota se llama velocidad de escape. Pero imaginemos que aumentamos progresivamente la masa de la Tierra. La velocidad necesaria para escapar de la atracción gravitatoria también aumentará. Pero llegará un momento en el que la masa de la Tierra será tan grande que la velocidad que necesariamente habría que imprimir a la pelota para que escapase de la atracción terrestre superaría la velocidad de la luz. En este momento la pelota quedaría atrapada. No podría ir más allá de cierto punto y volvería a caer atraída por la Tierra.

Esto es así según la visión clásica, anterior a Einstein, de la gravedad. Hacia finales del siglo XVIII, Laplace y el físico inglés John Michell ya habían fantaseado con la propuesta de que la luz podría quedar atrapada por un objeto con masa. Sin embargo, cien años después, el descubrimiento de Michelson y Morley del hecho de que la luz siempre viaja a la misma velocidad en el vacío implica que la luz no se comporta como la pelota. La gravedad no ralentizará la luz, como pensaron Laplace y Michell. Aunque la idea de Einstein de la gravedad como resultado de la curvatura del espacio-tiempo puede también hacer que la luz no pueda escapar. Las ideas de Einstein sugieren que es posible que exista una zona del espacio tan curvada que ni siquiera la luz (que carece de masa, pero que aun así resulta afectada por la curvatura del espacio) puede escapar de allí. El espacio está tan curvado que ningún rayo de luz puede encontrar el camino de salida y es desviado de nuevo hacia la zona de alta densidad. En 1967 el físico estadounidense John Wheeler se refirió caprichosamente a estas zonas como «agujeros negros». Richard Feynman pensó que el nombre era obsceno, ya que en francés *trou noir* significa también otras cosas. Sin embargo, el nombre perduró.

Al alejarse uno del centro de la estrella colapsada, el efecto de la gravedad decrece. Esto produce un borde en forma

de esfera, con el agujero negro en el centro, que representa un punto de no retorno: fuera de esta esfera la luz puede escapar; pero todo rayo de luz, u otra cosa cualquiera que esté dentro de ese borde, quedará atrapada al no tener energía suficiente para salir. Esta esfera se llama horizonte de sucesos del agujero negro, porque quien esté fuera de ella no puede presenciar los sucesos que ocurren dentro.

La masa de la estrella tiene que ser suficientemente grande como para que la masa se colapse dentro de la zona de esa esfera. Por ejemplo, la masa de la Tierra es demasiado pequeña como para crear un agujero negro: tendría que estar empaquetada en una esfera de sólo un centímetro de radio. Nuestro sol tampoco tiene la masa suficiente: el radio de su horizonte de sucesos sería de 3 kilómetros. Pero si la masa de la estrella es 1,4 veces más grande que la masa de nuestro sol, la presión de la gravedad hacia dentro contrarrestará cualquier otra presión hacia fuera producida por el intenso momento de la materia atrapada y se colapsará en el interior de su horizonte de sucesos.

Los agujeros negros han sido motivo de intenso debate desde que fueron propuestos teóricamente por primera vez, después de la publicación de las ecuaciones de la gravedad por parte de Einstein, en 1915. Algunos pensaban que, al colapsarse, las estrellas evitarían de algún modo convertirse en esas regiones sin salida. Quizá evacuando una parte de su masa. Esto es ciertamente posible, pero una estrella que tiene 20 veces la masa del Sol tendría que descartar el 95 % de su masa para evitar convertirse en un agujero negro, lo cual es muy poco probable. No obstante, algunos siguen apegados a la creencia de que estas regiones del espacio-tiempo no pueden darse.

En 1964 se identificó el primer ejemplo posible de una de estas zonas de alta densidad en la constelación del Cisne. Hacia 1971, a partir de los cálculos de su masa y concentración se conjeturó que la llamada Cygnus X-1 era un agujero negro.

No todo el mundo se convenció. De hecho, hubo una persona destacada que en 1975 hizo una apuesta defendiendo que Cygnus X-1 no era un agujero negro: Stephen Hawking. Esto resultaba extraño, dado que él había dedicado mucho tiempo en sus investigaciones a sondear la naturaleza de los agujeros negros. Si Cygnus X-1 resultara ser el primer ejemplo de un agujero negro, todas las meditaciones teóricas de Hawking quedarían justificadas.

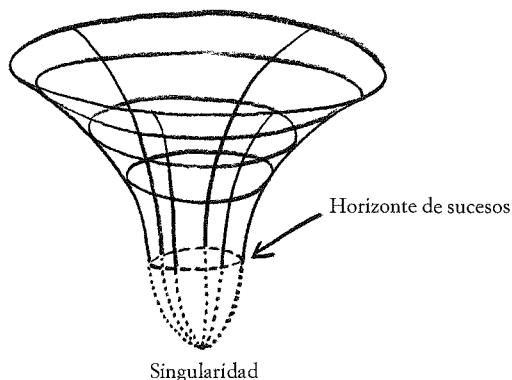
Como explicó en *Breve historia del tiempo*, su apuesta era un seguro de vida. Apostar a que tu equipo de fútbol perderá la final de la copa FA (Football Association Cup) es una apuesta en la que siempre ganas: si pierde tu equipo, al menos sacas un dinero. Si resultaba que el trabajo de toda su vida había sido una pérdida de tiempo, al menos ganaría la apuesta. ¿Qué apostó? Una suscripción a la revista *Private Eye*, para distraerse del fiasco de sus investigaciones vanas. La apuesta la hizo con su colega el cosmólogo Kip Thorne. Si se encontraran pruebas convincentes de que Cygnus X-1 era un agujero negro, Thorne ganaría una suscripción a la revista que él prefiriera. Eligió el *Penthouse*.

Hacia 1990 había bastantes pruebas de que Cygnus X-1 era un agujero negro: tenía una masa estimada equivalente a 14,8 veces la del Sol y era demasiado compacta como para ser una estrella. Se cree que Cygnus X-1 tiene un horizonte de sucesos de 44 kilómetros de radio. De esta esfera, cuyo diámetro equivale a la distancia entre Oxford y Cambridge, no puede escapar ningún rayo de luz. Examinados todos los datos, Hawking dio por perdida la apuesta. Thorne disfrutó de su suscripción a *Penthouse*, para disgusto de su esposa.

No obstante, hay algo matemáticamente perturbador en estos agujeros negros, algo que contribuyó a crear dudas sobre la posibilidad de su existencia. Al colapsarse una estrella, creando puntos de alta densidad, parecía que ya no quedaba nada que pudiera contrarrestar la atracción continua de la gravedad. Parecía que tenía que seguir colapsándose, hacién-

dose cada vez más pequeña y más densa, sin que nada detuviera esta implosión. ¿Seguiría por lo tanto colapsándose, creando un punto singular de densidad infinita? Había un ambiente de mucha hostilidad contra la idea de estos infinitos físicos.

El propio Einstein trató de probar lo absurdo de esta conclusión matemática. Eddington entendió lo que implicaban las matemáticas, pero se mostró reacio a reconocerlo: «Cuando probamos un resultado sin comprenderlo, o sea, cuando surge imprevisiblemente de un laberinto de fórmulas matemáticas, no tenemos base alguna en la que apoyarnos para esperar que sea real». Pero en 1964, el matemático de Oxford Roger Penrose probó que esos puntos singulares eran consecuencia necesaria de la teoría de la relatividad general.



Agujero negro en el espacio-tiempo bidimensional. El horizonte de sucesos es una circunferencia dentro de la cual no sabemos lo que pasa.

En colaboración con un joven Stephen Hawking, Penrose probó a continuación que puede predecirse esa misma densidad infinita cuando rebobinamos el universo hasta llegar a la Gran Explosión. Los agujeros negros y la Gran Explosión son ambos ejemplos de un ente matemático de la relatividad general que recibe el nombre de singularidad. Las singula-

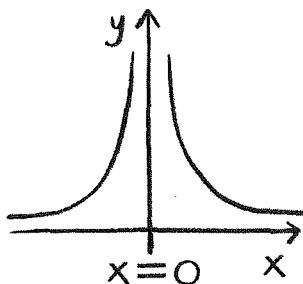
ridades cubren todo un abanico de situaciones en las que es imposible descubrir qué es lo que pasa. Una singularidad es un punto en el que nuestra capacidad para dar un modelo de la situación fracasa. Un punto en el que no nos queda otra opción que rendirse y reconocer que no sabemos.

SINGULARIDADES

Las singularidades son puntos en los que las funciones matemáticas hacen aguas. En matemáticas, una función es algo parecido a un programa de ordenador. Introducimos números, la función calcula con ellos y emite una respuesta. Los matemáticos suelen representar las funciones visualmente con gráficas. La entrada viene dada por un número en el eje horizontal, y marcamos el resultado medido en vertical a partir del eje horizontal, de lo cual resulta una curva.

Por ejemplo, consideremos la función cuya entrada es la distancia a un objeto con masa, y la salida la atracción gravitatoria sufrida en ese punto como consecuencia de la presencia del objeto con masa. Newton observó que cuanto más grande es la distancia, más débil es la atracción. Y descubrió una relación muy precisa entre la atracción y la distancia. Si estamos a una distancia x del planeta, la función de Newton estipula que la atracción de la gravedad es proporcional a $1/x^2$. Esto es lo que llamamos la ley del cuadrado del inverso. Podemos observar la gráfica de esta función en la página siguiente.

Pero algo interesante pasa cuando nos acercamos cada vez más al objeto. La fuerza se va haciendo cada vez más grande hasta que nos hallamos a una distancia $x = 0$, el resultado es infinito y la gráfica no tiene ningún valor. Por supuesto, en realidad estamos midiendo la distancia al centro de gravedad del planeta y, una vez que llegamos a la superficie del mismo, la función y la gráfica cambian, porque al traspasar la superficie, parte del planeta empieza a ejercer su atracción en el otro sentido. Cuando alcanzamos el centro de grave-



Gráfica de $1/x^2$. La función tiene una singularidad en $x = 0$.

dad, todas las fuerzas atractivas se compensan y experimentamos una atracción gravitatoria nula. Pero ¿qué pasaría si sustituimos el planeta por un agujero negro, una zona del espacio en la que toda la masa se supone que está concentrada en un solo punto? Ahora ese punto tendrá densidad infinita y podremos aproximarnos a él, y cuando lleguemos al mismo la atracción gravitatoria será infinita.

El hecho de que la función no tenga realmente sentido en $x = 0$ es lo que los matemáticos llaman una singularidad. Hay diferentes tipos de singularidades, pero todas ellas tienen un punto en el que la función no proporciona un valor que tenga sentido, o donde se produce una discontinuidad repentina con un salto entre un valor y otro.

Puede verse un ejemplo de singularidad bastante casero tomando una moneda y haciéndola girar sobre su canto encima de una mesa. Si no hubiera fricción o resistencia del aire, la moneda seguiría girando para siempre a velocidad constante. Sin embargo, como parte de la energía se disipa, la moneda acaba deteniéndose. Lo que ocurre es que el ángulo que forma con la mesa va decreciendo y, curiosamente, la velocidad de rotación aumenta de manera proporcional. Cuando el ángulo se aproxima a cero, la velocidad se hace finalmente infinita. Las últimas fases del giro consisten en que la moneda tiembla a la vez que cae y se produce un sonido chirriante

cuya frecuencia aumenta muy rápido hasta que súbitamente la moneda se detiene sin previo aviso.

Las ecuaciones del movimiento revelan que la velocidad de la rotación de la moneda aumenta hasta, después de cierto tiempo, alcanzar una velocidad infinita. Esto es lo que oímos cuando aumenta la frecuencia del sonido. La moneda que gira es un ejemplo de singularidad. Por supuesto, hay otros efectos que entran en juego a la hora de que no se produzca plenamente este infinito matemático, pero desvela que no es necesario que se nos trague un agujero negro para que las ecuaciones de la física produzcan infinitos.

Incluso las ecuaciones de Newton para los movimientos planetarios pueden producir singularidades. Como expliqué al final de la primera «frontera», el matemático Zhihong Xia descubrió que pueden colocarse cuatro planetas de modo que un quinto planeta salga despedido de su entorno y acabe alcanzando una velocidad infinita en un tiempo finito. Las ecuaciones no tienen nada que decir sobre lo que pasará después de que este planeta sufra los efectos de esa singularidad astronómica.

Por lo general, las singularidades son momentos en los que el infinito entra en juego y después de los cuales es imposible hacer predicciones. No sólo en física pueden surgir estas singularidades. Hay un ejemplo famoso, publicado en 1960 por Heinz von Foerster, Patricia Mora y Lawrence Amiot, que predice una importante singularidad aquí en la Tierra. La tasa de crecimiento de la población, si siguiera el patrón de comportamiento observado hasta 1960, indicaría que la población del planeta se haría infinita el 13 de noviembre de 2026. Que es viernes, por si hubiera algún lector supersticioso.

El modelo más sencillo de crecimiento de la población postula que es exponencial. Por ejemplo, una especie podría doblarse en número cada cincuenta años. Con un modelo así, la población rápidamente explota pero nunca se hace infinita.

Pero los análisis de los datos previos por parte de los autores indicaban que el período de tiempo que tarda en doblarse la población humana se iba acortando de manera paulatina.

La población tardó 1.650 años en doblarse, pasó de 250 millones de personas en el año 1 a 500 millones de personas en el año 1650. Alcanzó los mil millones 2.000 años después, en 1850. La siguiente duplicación solamente costó 80 años. La población alcanzó los 4.000 millones en 1976, solamente 36 años después. La tasa de crecimiento es más rápida que la exponencial. Así, en 1960, con los datos entonces disponibles, los autores estimaron que la población de la Tierra alcanzará una singularidad aproximadamente dentro de una década.

Otro ejemplo de este crecimiento superexponencial es la tasa de incremento de la potencia de los ordenadores. Hay una máxima llamada ley de Moore, que afirma que los ordenadores duplican su potencia cada 18 meses. Con este incremento, los ordenadores son cada vez más potentes, pero nunca alcanzarán una singularidad. Sin embargo, otros han sugerido que, igual que el tiempo que tarda la población en duplicarse parece acortarse de manera progresiva, lo mismo se aplica a la tecnología. La posibilidad de una singularidad tecnológica ha propiciado el nacimiento del movimiento de la singularidad o singularitarianismo. Popularizada por el inventor y futurista Ray Kurzweil en su libro *La Singularidad está cerca*, la singularidad alcanzaría a la humanidad en 2045. Según Kurzweil, en ese punto los humanos seremos capaces de crear inteligencia artificial que supere nuestra propia inteligencia. Ese momento llegará acompañado de un colapso en nuestra capacidad de predecir cómo será la vida a partir de tal singularidad.

Hay que ser cuidadosos con las ecuaciones matemáticas, porque puede haber alguna pieza oculta en ellas que se convierte en un factor significativo solamente al aproximarse a la singularidad, y que podría desempeñar un papel impor-

tante a la hora de impedir la realización física de ese infinito. Esto ocurre claramente en el caso del crecimiento de la población, porque el área finita de la superficie de la Tierra, a partir de un umbral, limita el tamaño total de la población.

Factores parecidos podrían salir a escena en el caso de la Gran Explosión y los agujeros negros. Algunos han sugerido que las ecuaciones de la relatividad general no rigen en estas situaciones tan extremas. Por ejemplo, es posible que haya que introducir otro término en las ecuaciones de Einstein para la gravedad que afecta realmente a las ecuaciones sólo al acercarse a la singularidad. Esto alteraría lo que pasa al acercarnos a la singularidad de la Gran Explosión, pero ese componente extra sería prácticamente indetectable antes de llegar a esas condiciones extremas. Es como el cambio sutil que Einstein tuvo que introducir al considerar cosas que viajaban a una velocidad próxima a la de la luz: a baja velocidad, simplemente sumamos las velocidades; pero Einstein se dio cuenta de que en el caso de velocidades próximas a la de la luz era preciso ser más cuidadosos. Como expliqué en el capítulo anterior, la fórmula para la velocidad de un hombre que corre sobre un tren en movimiento en relación al andén está dada por la suma de la velocidad del hombre y la del tren, pero luego hay que dividir por una segunda expresión. En velocidades bajas, la segunda expresión toma un valor tan próximo a 1 que tiene un efecto muy pequeño, y por eso los científicos anteriores a Einstein creyeron que las velocidades simplemente se sumaban. Pero próximos a la velocidad de la luz domina un comportamiento diferente. Lo mismo podría pasar al aproximarnos a la Gran Explosión o a un agujero negro. Las ecuaciones de la relatividad general podrían necesitar un término extra que sale a escena solamente en casos en los que la gravedad es muy fuerte.

No obstante, si el universo realmente contiene estos puntos singulares de densidad infinita, ¿qué efecto tienen sobre el tiempo? Einstein descubrió que al aumentar la gravedad

el tiempo se ralentiza. Entonces, si me aproximo a uno de estos puntos singulares con una atracción gravitatoria extrema, ¿qué le pasará a mi reloj?

LA INCÓGNITA OCULTA EN UN AGUJERO NEGRO

Si arrojamamos el reloj a un agujero negro, pasa una cosa extraña. Si estamos en la Tierra y observamos el reloj según se aproxima al agujero negro, hay un momento en el que parece que el tiempo se detiene. El reloj avanza cada vez más despacio hasta que se para. Finalmente la imagen del reloj se queda congelada y después se desvanece. El horizonte de sucesos que rodea al agujero negro es como una burbuja en el espacio más allá de la cual parece que el tiempo se colapsa. No puede continuar. Desde nuestra perspectiva fuera del «agujero negro», no tiene un «después». ¿Podría ser esto lo contrario de lo que le ocurre al tiempo cuando nos remontamos hacia la Gran Explosión? El tiempo no tiene un «antes».

Pero recordemos que todo esto es desde nuestro punto de vista, al comparar el tiempo en la Tierra con el tiempo que podemos ver en el reloj según se dirige hacia el agujero negro. ¿Cómo se ven las cosas si me pongo el reloj en la muñeca y lo acompaño en su viaje hacia esta singularidad matemática? La experiencia sería entonces muy diferente. Desde la Tierra, cuando el reloj llega al horizonte de sucesos del agujero negro, parece que se para. Pero desde mi nuevo punto de vista, cuando cruce el horizonte de sucesos, me parecerá que el reloj sigue funcionando normalmente. De hecho, ni siquiera podría detectar en qué momento he cruzado la línea después de la cual no hay vuelta atrás.

Eso no quiere decir que todo vaya bien según me acerco al agujero negro, porque lo que le ocurre al espacio-tiempo al aproximarme a ese punto infinitamente denso no se puede despachar tan fácilmente. Al acercarme con los pies por de-

lante hacia el agujero negro, la gravedad tiraría de mis pies con más fuerza que de mi cabeza, estirándome hasta convertirme en un espagueti. En un tiempo finito, todo sería devorado por la singularidad, incluido el reloj, y el tiempo terminaría. Como una raya dibujada en una hoja, el tiempo llega hasta ella y no puede atravesar más allá.

Es extraño que en los demás sitios el tiempo siga transcurriendo inconscientemente. Sé que a todos nos espera un mismo destino. Cuando morimos, el tiempo se detiene para nosotros, pero sabemos que el tiempo seguirá transcurriendo como si nada. Igual que no podemos experimentar nuestra propia muerte, tampoco podríamos experimentar la llegada a un agujero negro.

Un amigo físico me dio un consejo por si alguna vez me caía en un agujero negro: como en el caso de las arenas movedizas, lo mejor es no agitarse. Si simplemente me dejo llevar hacia mi destino, viviré un poco más. Esto parece muy contraintuitivo. Pero mi amigo físico me recordó lo que le ocurre al reloj bajo los efectos de la gravedad y la aceleración. Si me agito y trato de alejarme de la singularidad, el tiempo pasará más lentamente donde estoy. Al aumentar la aceleración o la gravedad, los relojes se ralentizan. Por lo tanto, me veré adelantado al futuro del espacio-tiempo que me rodea—recuérdese lo que le pasaría a mi hija Ina después de sufrir una aceleración: se vería enviada hasta el futuro de su hermana gemela Magaly—. Así que si me agito al llegar a la singularidad, habré envejecido menos. Pero eso no es tan bueno: desapareceré extinguido en la singularidad después de haber experimentado menos vida. De manera que es mucho mejor no agitarse y disfrutar el mayor tiempo posible antes de llegar a la singularidad.

Lo interesante es que alguien que se halle fuera del horizonte de sucesos nunca podrá saber lo que está pasando dentro. Desde su punto de vista, parece que el tiempo se para en cuanto se cruza el horizonte de sucesos, de modo que para

él no hay ninguna historia posterior, aunque sí que hay un después para mí según me voy convirtiendo en un espagueti. En consecuencia, preguntar qué pasa después sí parece tener bastante sentido. Tiene una respuesta. El único problema es que si estamos fuera del horizonte de sucesos, las leyes de la física nos impiden el acceso a la respuesta.

Se creyó que este mismo principio era aplicable al reto de saber qué ocurrió antes de la Gran Explosión, si es que ocurrió algo. El tiempo se acaba dentro de un agujero negro. Pero la Gran Explosión es como el colapso de una estrella para convertirse en un agujero negro, sólo que al revés. Así que deberíamos también deducir que el tiempo se acaba cuando nos remontamos hacia la Gran Explosión. En otras palabras, deberíamos concluir que el tiempo tuvo un comienzo, que el tiempo mismo arranca en la Gran Explosión.

Las singularidades en el espacio-tiempo son fronteras, puntos en los que el espacio-tiempo se acaba y no podemos pasar más allá. Una frontera en el espacio y el tiempo es difícil de entender: aunque nos prohíban pasar a nosotros, sentimos de todos modos que algo debe de haber más allá de ésta.

Estos agujeros negros son un reto no sólo para nuestro concepto del tiempo, sino que también parecen contradecir otro de los descubrimientos de la física moderna: que la información nunca se pierde.

LA TRITURADORA DE PAPEL DEFINITIVA

Hay una consecuencia bastante notable de las leyes de la física cuántica y es que son reversibles. Lo que significa que la información nunca se pierde. Esto es muy contraintuitivo. Por ejemplo, si nos suscribiéramos a dos revistas, *Private Eye* y *Penthouse*, y quemásemos los ejemplares publicados en un año por una y por otra, parece imposible que pudiéramos determinar alguna vez qué montón de cenizas corresponde a la una y qué montón a la otra.

Pero, dado que tenemos información completa sobre los átomos y fotones que participaron en la fogata, teóricamente es posible invertir el proceso y recuperar la información contenida en las revistas. En la práctica, sería por supuesto tremendamente difícil, pero la ciencia dice que no hay nada irreversible en este proceso. Las leyes de la física funcionan en los dos sentidos.

La existencia de agujeros negros desafía esta idea. Si arrojamus una de las revistas a un agujero negro y la otra a otro, ahora sí que es imposible saber a qué agujero negro fue a parar cada una de ellas. Los agujeros negros parecen ser las trituradoras de papel perfectas, ya que en ellos la información parece perderse de verdad.

Los agujeros negros son especialmente interesantes en mi búsqueda de aquello que nunca podremos conocer, ya que una vez que algo haya desaparecido detrás del horizonte de sucesos—la frontera más allá de la cual la luz ya no puede escapar—parece que de hecho perdemos información sobre lo que ha cruzado ese horizonte. Si tomo el dado de casino que me ha acompañado en mi búsqueda de cosas imposibles de conocer y lo arrojo al agujero negro, una vez que pasa a través del horizonte de sucesos parece que nunca podré saber qué número ha salido. Podría haber una mesa al otro lado sobre la que caiga el dado y salga un 6. Alguien que estuviera al otro lado del horizonte de sucesos podría verlo, pero sería incapaz de comunicar el resultado porque todo queda atrapado dentro.

Según la física de la relatividad general, lo único que podemos saber sobre un agujero negro desde el exterior es su masa, su momento angular y su carga eléctrica. El resto de la información se ha perdido. A esto se le ha llamado, de manera muy visual, teorema de la ausencia de pelo, ya que cualquier otra información supondría la existencia de pelos en esta pelota redonda calva del agujero negro. Podría tirar dentro mis dados, mi violonchelo y mi reloj de pulsera, y una vez

que hubieran traspasado el horizonte de sucesos, no quedaría nada en el agujero negro ni en su entorno que pudiera dar alguna pista de lo que arrojé. No hay ningún modo de invertir los acontecimientos para ver qué traspasó ese horizonte de sucesos.

Aunque suele recibir el nombre de teorema, en realidad debería llamarse conjetura, porque no hay ninguna prueba concluyente de que la información se pierda. De hecho, en 1974 se planteó hasta dónde el horizonte de sucesos podría enmascarar lo que pasa dentro de un agujero negro. Según Stephen Hawking, esto sucede porque los agujeros negros «eructan».

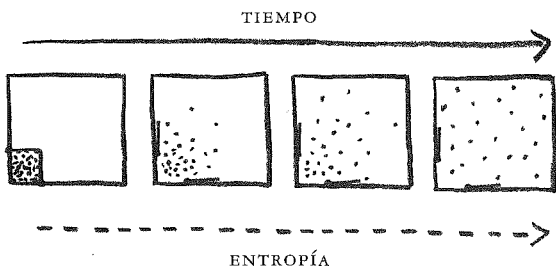
AGUJEROS NEGROS NO TAN NEGROS

Una vez lanzado el dado a un agujero negro, parece que no hay ningún mecanismo que permita saber cómo cae. Al menos muchos piensan que ésta ha de ser la consecuencia de semejante concentración de masa deformadora del espacio-tiempo. Pero cuando Hawking aplicó la segunda ley de la termodinámica a los agujeros negros, resultó que no eran tan negros como todo el mundo había pensado al principio.

La segunda ley de la termodinámica dice que nos movemos de un mundo muy ordenado a otro en desorden. Lo que cambia es lo que se llama la entropía de un sistema. La entropía es una medida del desorden. Esencialmente, mide el número de posibles escenarios diferentes, que a su vez será una medida de lo probable que resulta que uno de dichos escenarios se haga realidad. Y la segunda ley afirma que la entropía del universo crece.

Un ejemplo clásico del aumento de entropía es considerar un gas encerrado en un contenedor. Si el gas está concentrado en un rincón (imaginemos, por ejemplo, que ha sido confinado en él con ayuda de paredes internas que después se han retirado), con el tiempo se dispersará por todo el conte-

nedor. La entropía cuenta cuántos escenarios son posibles para el gas. Cuando el gas está atrapado en el rincón, hay menos escenarios posibles que después de que las paredes internas hayan sido retiradas y el gas pueda ocupar todo el contenedor. La entropía aumenta al tiempo que lo hace el número de escenarios posibles. La entropía empieza siendo baja y después aumenta.



Consideremos otro ejemplo de la vida cotidiana, el del huevo que se cae de la mesa y se estrella contra el suelo. El huevo original, que gozaba de un orden muy estricto, se convierte en una masa pegajosa mezcla de fluido y cáscara. Ahora hay muchas más maneras de recomponer la cáscara que cuando estaba entera rodeando al huevo. Si vemos un vídeo de esta escena hacia delante y hacia atrás, quedará claro cuál de las direcciones representa el verdadero paso del tiempo. La entropía creciente controla el sentido de la flecha del tiempo.

Por eso la entropía está íntimamente relacionada con el concepto de tiempo. Es una de las pocas cosas que nos ayudan a saber en qué sentido hay que hacer girar la bobina. Muchas otras leyes de la física funcionan igual de bien en ambos sentidos. Aunque sea físicamente posible que el huevo suba a la mesa y se vuelva a ensamblar como antes, la disminución de la entropía indica lo poco probable que resulta esto.

Y sin embargo, sería bueno plantearse de dónde viene en primera instancia el orden original que posee el huevo. Uno

podría aducir que este movimiento del orden hacia el desorden no es lo que se ve en la Tierra. Hemos evolucionado desde una ciénaga turbia hasta un estado en el que existe vida, huevos y orden. Esta violación aparente de la segunda ley de la termodinámica se explica porque la Tierra recoge entropía baja de otra fuente: hay un mercadeo en marcha. Los fotones que llegan del Sol, que son la fuente de la vida en la Tierra, tienen baja entropía. Pero, en vez de calentarse, la Tierra emite calor en forma de ondas electromagnéticas de baja frecuencia (y por lo tanto de baja energía), aunque en mayor cantidad.

Así que unas pocas ondas de alta energía procedentes del Sol son intercambiadas por una gran cantidad de ondas de baja energía que emite la Tierra. Este incremento del número de rayos significa un incremento del número de posibles escenarios para la emisión de los rayos. El proceso es similar al de la rotura del huevo. La Tierra absorbe un solo fotón de alta energía, como el huevo al caer al suelo, y luego expelle una gran cantidad de fotones de baja energía que serían equivalentes a los trozos de cáscara de huevo. La Tierra se beneficia con un decrecimiento neto de su propia entropía, y del caos vemos emerger un orden. Pero si consideramos como uno solo el sistema formado por la Tierra y el Sol, la entropía de hecho aumenta, como exige la segunda ley de la termodinámica.

¿Qué le pasa entonces al contenedor de gas al arrojarlo a un agujero negro? O lo que es más intrigante todavía: ¿qué le sucede a su entropía? Estando fuera del horizonte de sucesos, se supone que perdemos toda información sobre lo que está pasando dentro. ¿Se perderá la entropía, en cuyo caso la entropía decrecería, contradiciendo así la segunda ley de la termodinámica? Quizá habría que considerar que el agujero negro tiene su propia entropía, que aumentaría al ser alimentado con nueva materia. Pero como no tenemos ni idea de lo que pasa dentro de un agujero negro, se ha sugerido que la

entropía podría ser proporcional al área de la superficie de la esfera que define el horizonte de sucesos, algo que podríamos conocer y calcular. Todo esto está muy bien, pero la física implica que las cosas que tienen entropía tienen también temperatura y las cosas con temperatura emiten calor. Según esto, los agujeros negros deberían emitir una radiación inversamente proporcional a la cantidad de masa de la que están formados. Si emitieran radiaciones, no serían tan negros como su nombre indica, y resplandecerían amablemente en el cielo nocturno.

BORDES INDEFINIDOS

Esto no tenía sentido. ¿Cómo puede emitir radiaciones un agujero negro, si se supone que todo ha de quedar atrapado dentro, incluida la luz? Ni siquiera parecía haber un mecanismo para explicar la posibilidad de que esto pase. Así estaban las cosas hasta que Hawking recurrió a la mecánica cuántica. El principio de incertidumbre de Heisenberg implica que el horizonte de sucesos es un poco más confuso de lo que sugieren las matemáticas de la relatividad general. Como vimos en la tercera «frontera», el principio de incertidumbre implica que la posición y el momento no pueden ser conocidos ambos con precisión. Análogamente, el tiempo y la energía están relacionados de tal modo que no podemos conocer ambos simultáneamente. Por lo tanto, no podemos tener un vacío perfecto en el que todo valga cero. Si todo valiera cero, tendríamos un conocimiento preciso de todo.

El vacío experimenta fluctuaciones cuánticas, de modo que, por ejemplo, puede aparecer una partícula y una antipartícula, una con energía positiva y otra con energía negativa. Fue posiblemente este mecanismo de sacar algo de la nada el que alumbró el universo y el que lo puso en marcha. Por lo general, en el vacío del espacio, la partícula y la antipartícula se anularán rápidamente la una a la otra. Pero si esta

pareja se forma de modo que la partícula con energía positiva se queda fuera del horizonte de sucesos de un agujero negro y la partícula con energía negativa queda atrapada dentro, sucede algo interesante.

Se produce este extraño efecto: la partícula de dentro es absorbida por el agujero negro, y como tiene energía negativa, reduce la masa del mismo; por el contrario, la partícula con energía positiva se queda fuera y parece que ha sido radiada por el agujero negro. El agujero negro resplandece: posee temperatura, lo mismo que esperaríamos si tuviera entropía positiva.

Un momento. La mitad de las veces la partícula con energía positiva acabará en el interior y no en el exterior del horizonte de sucesos. ¿No haría esto que el agujero negro incrementara su masa? La manera de responder esta pregunta es explicar que una partícula con energía negativa que quede fuera del horizonte de sucesos no tiene energía suficiente para escapar de él, así que el efecto final de estas fluctuaciones cuánticas aleatorias es un decrecimiento global de la masa del agujero negro con el tiempo.

La radiación de Hawking, como se conoce, no ha sido detectada en ninguno de los agujeros negros identificados hasta ahora. El problema es que las matemáticas implican que la tasa de emisión depende inversamente de la masa del agujero negro. Así que un agujero negro con la masa de varios soles emitirá radiaciones a un ritmo tan lento que se sitúa por debajo de la temperatura de la radiación cósmica de fondo, lo cual significa que es imposible de detectar contra el ruido de fondo dejado por la Gran Explosión.

La consecuencia sorprendente de la propuesta de Hawking era que proporcionaba un mecanismo para que los agujeros negros se consumieran, al reducirse su masa con el paso del tiempo. Al decrecer la masa, la radiación aumenta, con el resultado esperado de que los agujeros negros finalmente harán «pum» y desaparecerán. Hawking predijo que el

«pum» sería bastante considerable, el equivalente a la explosión de millones de bombas de hidrógeno. Otros piensan que se aproximaría más al estallido de un obús.

Sin embargo, esto deja un enigma por resolver. ¿Adónde va la información que fue absorbida por el agujero negro? Uno puede aceptar el hecho de que esa información se encontraba atrapada dentro del agujero negro: al menos todavía existía. Pero si el agujero negro finalmente desaparece, ¿se desvanece con él la información o está codificada de algún modo en la radiación que emite la singularidad? Si arrojo el dado de casino a un agujero negro, ¿podré deducir de alguna manera cómo cayó mediante las partículas emitidas en el borde del horizonte de sucesos? Como en el caso de las revistas quemadas, en teoría quizá haya una manera de descifrar esta radiación y recuperar la información de todo lo que desapareció en su momento detrás del horizonte de sucesos. El enigma de lo que le pasa a esta información se conoce como la paradoja de la pérdida de información en los agujeros negros.

En 1997 Hawking hizo otra apuesta, esta vez no con Kip Thorne, que estaba de su parte, sino con John Preskill, físico teórico de Caltech. Los dos primeros creían que la pérdida de información en los agujeros negros era inevitable, mientras que Preskill no aceptaba esto, ya que contradecía la teoría de la física cuántica. Lo que se apostaban ahora no era la suscripción a una revista, sino la enciclopedia que el ganador eligiera. Una enciclopedia casaba con la idea de la información arrojada a un agujero negro: ¿podría la información contenida en dicha enciclopedia estar de algún modo codificada en las nuevas partículas que eran emitidas desde el agujero negro en virtud del principio de incertidumbre?

En 2004 Hawking se rindió públicamente y dio por perdida la apuesta. Preskill consiguió como premio el libro *Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia*, la enciclopedia oficial de la liga de béisbol de Estados Unidos. Hawking

bromeó: «Le regalé a John una enciclopedia de béisbol, pero quizá debería haberle regalado sólo sus cenizas».

Hawking piensa ahora que la información que es absorbida por un agujero negro queda de hecho codificada sobre la superficie de su horizonte de sucesos y va luego siendo transferida a las partículas que se emiten. Extrañamente, esta superficie es bidimensional y, sin embargo, parece codificar información sobre el espacio tridimensional que encierra en su interior. Y ha conducido a la idea del universo holográfico: en realidad, la totalidad de nuestro universo tridimensional es solamente la proyección de la información contenida en una superficie bidimensional. Si bien Hawking se rindió, Thorne se ha mantenido firme en su creencia de que la información se pierde.

Roger Penrose, como Thorne, piensa que Hawking renunció a su apuesta demasiado pronto. Una vez que el agujero negro se ha consumido en virtud de la radiación emitida, Penrose cree que la información y la entropía se pierden. Para Penrose, éste es un punto relevante que explica por qué el universo empezó en un estado de entropía tan baja. ¿Por qué al comienzo había orden, de modo que se pudo poner en marcha la segunda ley de la termodinámica desde el primer momento? ¿De dónde provenía ese orden? Si los agujeros negros destruyen la entropía, podrían proporcionar un mecanismo para reiniciar el universo con un estado de entropía baja.

Penrose había sido siempre un defensor de la Gran Explosión como una frontera más allá de la cual la física no tiene sentido. A medida que nos remontamos en el tiempo hasta la Gran Explosión, las ecuaciones de la física hacen aguas. Si aceptamos la descripción de la Gran Explosión como un punto de densidad infinita, en muchos aspectos no tiene sentido explorar la cuestión de qué pasó antes: las leyes de la física podrían comportarse de cualquier modo al otro lado de esta singularidad. No podemos medir nada que esté más allá

de esta singularidad, de modo que nada se pierde si consideramos que ni siquiera existe. ¿O perdemos algo? Penrose ha cambiado de opinión al respecto.

UNIENDO EL PASADO Y EL FUTURO

Van apareciendo nuevas teorías de lo que podría haber ocurrido antes de la Gran Explosión, y una de las más destacadas es la de Penrose: propone que la Gran Explosión es solamente una dentro de un ciclo infinito de otras grandes explosiones. Ésta no es la primera vez que se ha sugerido dicha posibilidad: cuando se pensó que el universo terminaría con una gran implosión, parecía una buena idea convertir la implosión en la Gran Explosión de una nueva era.

Pero, como descubrimos en la cuarta «frontera», el universo no se contrae, sino que se expande a un ritmo acelerado, dirigiéndose hacia un estado frío en el que no existirán ni vida, ni galaxias y ni siquiera materia, solamente fotones. Esto es lo que Penrose llama la «era muy aburrida». Se cree incluso que los agujeros negros que devorarán a muchas de las galaxias que vemos ahora emitirán radiaciones, de modo que también ellos acabarán consumiéndose, y desaparecerán con un «pum» final que dejará un universo lleno de fotones y gravitones, las partículas hipotéticas sin masa que presumiblemente son la vía que establece la fuerza de la gravedad.

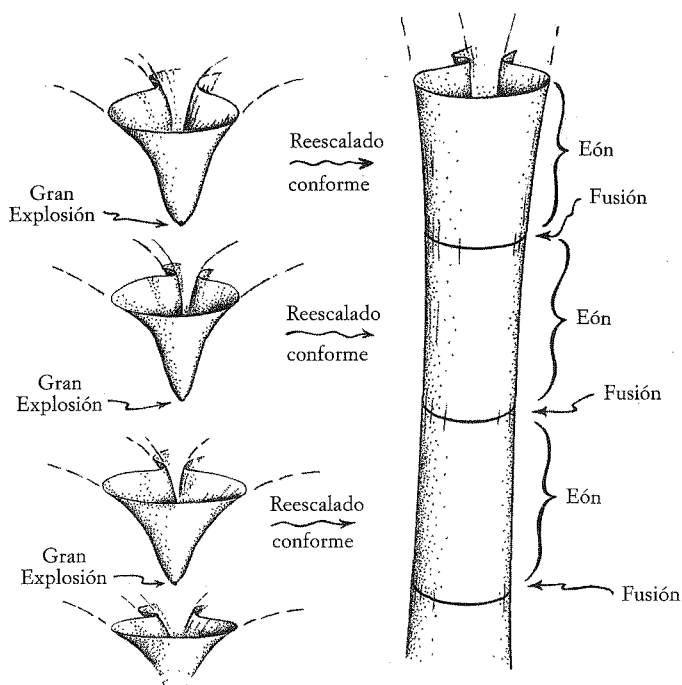
Penrose admitió sentirse un poco deprimido por esta visión de nuestro universo futuro: «Dios mío, ¿es esto lo que nos espera?». Pero entonces pensó en quién estaría por allí para presenciar ese «aplastante tedio final». Nosotros no, ciertamente. Las únicas cosas que quedarían por allí para aburrirse serían los fotones y los gravitones, que se convertirían en las únicas componentes del universo.

Pero resulta que el fotón es ajeno al concepto de tiempo. Vive en un entorno sin tiempo. Cuando una cosa se aproxima

a la velocidad de la luz, la relatividad implica que el tiempo se ralentiza; tanto es así, que cuando alcanza la velocidad de la luz, el reloj se para. Pero esperen un momento. La luz viaja a la velocidad de la luz. Esto significa que un fotón es ajeno al concepto de tiempo. De hecho, según la teoría de Penrose, en la que todas las partículas con masa se habrán desintegrado produciendo fotones o gravitones, no habrá ya nada que mida el paso del tiempo, nada con lo que hacer un reloj. Análogamente, como el tiempo es esencial para medir el espacio, este futuro universo habrá perdido toda capacidad para cuantificar y medir distancias, y el hecho de ser grande o pequeño habrá perdido todo sentido.

En vez de rendirse al pesimismo, Penrose vio aquí una oportunidad: ¿esto no se parecía mucho al estado del universo justo después de la Gran Explosión? Un universo lleno de energía, pero todavía sin materia formada. Admitamos en cualquier caso que toda esa energía se suponía concentrada en una zona infinitamente pequeña, creando así las condiciones para la Gran Explosión. Pero si el universo ha perdido todo sentido de escala, ¿no podrían las condiciones que se dan al final de nuestro universo ser el punto de partida para una nueva Gran Explosión, de modo que el universo que emerge se haya reacomodado para concentrar la energía en un nuevo principio?

Estas dos teorías—un universo que termina con una muerte fría y aburrida y un universo que renace con una nueva y emocionante Gran Explosión—pueden de hecho fusionarse sin problemas, como dos paisajes cuyos bordes coinciden perfectamente para formar un nuevo paisaje continuo más amplio. El cosido de estas dos teorías exige que el fin de uno de los universos se contraiga y el origen del nuevo se expanda, de modo que puedan fusionarse ambos sin esfuerzo y se pueda pasar del uno al otro sin fisuras. Los fotones fríos y aislados se convierten en fotones cálidos y próximos, y dan origen a una nueva Gran Explosión.



Reescalando el universo al final de un eón con el principio del siguiente, podemos pasar sin problemas de uno a otro.

La teoría de Penrose es polémica, y no he podido encontrar a muchos científicos que piensen que es algo más que una idea matemática inteligente. También es verdad que cuando Penrose explicó por primera vez que las matemáticas de la relatividad general predecían la existencia de singularidades en el espacio-tiempo, muchos descartaron la idea por conducir a algo físicamente imposible. Su teoría actual de los ciclos de tiempo podría resultar falsa, pero a mí me parece muy estimulante que un científico esté dispuesto a cambiar de opinión sobre la posibilidad de explorar el tiempo antes de la Gran Explosión.

Al período comprendido entre una Gran Explosión y la siguiente, Penrose lo llama *eón*, y nuestro eón es solamente

uno de los posiblemente infinitos eones que nos precedieron y que vendrán después de nosotros.

Para este modelo, y para muchos modelos cíclicos, la segunda ley de la termodinámica supone todo un reto. ¿Cómo se puede reacomodar la entropía en un valor tan bajo que haga posible que arranque de nuevo la segunda ley de la termodinámica en cada nuevo eón?

La singularidad de la Gran Explosión es un estado de muy baja entropía. Al evolucionar el universo, la entropía aumenta. ¿Cómo podemos entonces pasar sin problemas al siguiente eón y reiniciar el contador de la entropía? Por eso Penrose no estaba muy de acuerdo cuando Hawking tiró la toalla en su apuesta sobre los agujeros negros. En opinión de Penrose, los agujeros negros son el mecanismo para reiniciar la entropía. Toda la entropía que entra en un agujero negro se pierde o se resta del total del sistema, de modo que al final del eón tenemos baja entropía otra vez, porque toda la información se ha ido perdiendo en la plétora de agujeros negros que inundaban el universo. Esto prepara las condiciones para la próxima Gran Explosión.

Aunque la teoría fuese correcta, ¿cómo podríamos alguna vez excavar hasta el período que precedió a nuestra Gran Explosión para comprobar ésta u otras teorías? ¿Es «antes de la Gran Explosión» una zona de acceso prohibido? Penrose piensa que no. Dado que los dos paisajes han de fundirse el uno con el otro, las cosas que pasaron en el eón anterior podrían tener un impacto en el nuestro. Él cree que los choques entre los agujeros negros en las últimas etapas del eón anterior podrían haber producido ondas gravitatorias que han pasado a nuestro eón. Compara esto con un estanque al que se han lanzado unas cuantas piedras. Una vez que las piedras—es decir, los agujeros negros—han desaparecido, sigue quedando un patrón de olas como resultado de la serie de círculos crecientes entrecruzados que aquéllas han producido.

Penrose cree que esto es algo que podríamos buscar en la radiación cósmica de fondo, la radiación que dejó la Gran Explosión con la que empezó nuestro universo. Aunque las fluctuaciones que recorren esta radiación parecen aleatorias, quizá algunas de ellas son el resultado de los choques entre agujeros negros producidos hacia el final del último eón.

El problema es que la radiación cósmica de fondo es notablemente difícil de analizar, entre otras cosas porque hay muy poca. Esto parece disparatado, ya que esa radiación constituye la superficie de una esfera que encierra el universo observable. Y sin embargo, si queremos repasar secciones de esta esfera que rodea el universo y necesitamos tomar secciones que recorren 10 grados de arco, enseguida nos saldremos de zonas que todavía no hemos observado. Aunque muchos son escépticos sobre la posibilidad de encontrar pruebas de eones previos en nuestro eón actual, todo esto plantea la posibilidad fascinante de que quizá la cuestión de qué pasó antes de la Gran Explosión ¡no es tan imposible de responder como pensábamos!

UN GALILEO MODERNO

Me acerqué hasta el despacho de Penrose, que está un piso más abajo que el mío en la universidad de Oxford, para oír qué opinaba sobre el asunto de si será posible o no saber alguna vez lo que pasó antes de la Gran Explosión. Con ochenta años cumplidos, Penrose es un ejemplo magnífico de cómo el deseo es inmarcesible. Como escribió un libro con el subtítulo *Guía completa de las leyes del universo*, sería fácil suponer que piensa que lo sabe ya todo. Pero Penrose sigue haciéndose nuevas preguntas.

—Solía decir que la Gran Explosión era una singularidad y que esto implicaba que la noción de tiempo no tiene ningún sentido antes de la Gran Explosión. Hablar de un «antes» es un sinsentido. No se hagan esta pregunta. Le he oído

decir esto a Stephen Hawking y yo mismo estaba de acuerdo. Pero ahora opino que sí podemos permitirnos planteárnosla.

¿Significaba lo anterior que Penrose pensaba que no había un comienzo?

—Lo que creo es que hay una serie infinita de eones.

Le pregunté si nos encontrábamos ante un ejemplo de algo que nunca podremos saber. Al fin y al cabo, el infinito es normalmente una zona de acceso prohibido en física.

—Podríamos ser capaces de mejorar la tecnología y ver qué pasó hace unos pocos eones. Pero ¿llegar hasta el principio de todos ellos? Bueno, sí, esta cuestión podría ser una buena candidata de algo que nunca podremos saber. La gente dice que el infinito es incognoscible, pero en matemáticas se usa sin parar. Con él nos sentimos cómodos como en casa. Bueno, si no del todo, por lo menos bastante cómodos.

Cuando le pregunté si pensaba que había alguna cuestión que por su misma naturaleza carecía de respuesta, se mostró muy cauto, como de costumbre.

—No he pensado mucho en el concepto de que podría haber algo que siempre quedará fuera del alcance de nuestro conocimiento. Habrá cuestiones para las que no es esperable tener una respuesta, supongo. Problemas que pensamos que son irresolubles, pero un buen día se descubre algún modo de sortearlos y hacerse cierta idea de ellos. No me gusta el término *incognoscible*. Solamente significa que no estamos mirando las cosas del modo adecuado.

»Podríamos haber pensado que nunca se sabría lo que pasa en el interior del Sol, pero ahora sí se sabe. No hace tanto, la gente pensaba que era una cuestión imposible, supongo.

»¿Se pueden multiplicar dos números increíblemente grandes, cuando el resultado tiene más dígitos que partículas hay en el universo y, por lo tanto, no puede escribirse? ¿Cuenta éste como un problema irresoluble? Lo parece, ciertamente, pero más que irresoluble, habría que decir que es tedioso.

»Yo me inclino más bien (aunque no digo que esté asumiendo una postura firme) a favor de que no hay nada que sea absolutamente imposible de conocer. —Penrose parecía preocupado—. Espero no haberte defraudado por decir que no existen cosas imposibles de conocer.

Sugerí que éste podría ser un estado mental importante para dedicarse a la investigación científica.

—Un problema puede ser muy difícil, pero de alguna manera uno siente que debe haber alguna solución. Al menos yo lo siento así, pero no sé si está justificado. No espero ver las respuestas a algunos grandes problemas en el tiempo de vida que me queda, pero sería bonito ver resueltos algunos de los más inmediatos.

Quise saber qué problema querría ver resuelto, si pudiera elegir uno. Como el tiempo es lo que ocupa ahora la mente de Penrose, eligió el descubrimiento de que había algo antes de la Gran Explosión.

—Me gustaría ver señales del eón anterior. Pero estamos muy lejos de eso.

Pero entonces, ¿obviar la necesidad de que haya un comienzo es una amenaza para aquellos que creen en un Dios que lo creó todo? Penrose se ríe al acordarse de lo preocupado que estaba pensando que su propuesta iba a levantar ampollas en los ambientes eclesiásticos, como le pasó a su héroe Galileo.

—Asistí al congreso que se celebró en el Observatorio del Vaticano y la verdad es que estaba un poco nervioso. Pero luego recordé que el Vaticano rendía homenaje a Galileo y conmemoraba la invención del telescopio astronómico. Así que describí mi teoría de los ciclos de tiempo y pensé que podrían sentirse un poco incómodos al escuchar que la Gran Explosión no tenía por qué ser el principio de todo. Su respuesta fue: «No, está muy bien... Dios lo creó todo».

FUERA DEL TIEMPO

La respuesta del Vaticano apunta a una cuestión que ha intrigado siempre a los pensadores religiosos: ¿cuál es la relación de Dios con el tiempo, especialmente después de las revelaciones modernas sobre su naturaleza flexible? La teoría de la relatividad especial de Einstein cuestiona el que se pueda decir que un suceso ocurre después de otro. Desde un punto de vista, el suceso A ocurre antes que el suceso B, pero Einstein probó que, desde otro punto de vista, el suceso B puede ocurrir antes que el suceso A.

Para los comentaristas religiosos esto plantea un reto interesante: ¿cuál es el punto de vista de Dios? Para Dios, ¿el suceso A ocurre antes que el suceso B o al revés? Una solución es responder como hizo el representante del Vaticano: Dios está fuera del tiempo. Igual que Dios no está localizado en ningún punto del espacio, tampoco hay necesidad de localizarlo en ningún punto del tiempo.

Un extraño contemplaría el espacio-tiempo como quien está en la cumbre de una montaña y contempla las tierras que se extienden a sus pies. Pero esta visión del espacio-tiempo incluye el pasado, el presente y el futuro, todo el tiempo de una vez. Aunque no estaba planteada en términos de geometría tetradimensional lorentziana, ésta fue de hecho la postura adoptada por san Agustín de Hipona, teólogo del siglo IV.

Einstein trató de utilizar esta visión del tiempo para consolar a la viuda de su amigo Michele Besso, escribiéndole: «Ahora se ha ido de este extraño mundo un poco antes que yo. Esto no significa nada. La gente como nosotros, que cree en la física, sabe que la distinción entre pasado, presente y futuro es sólo una ilusión tercamente persistente». Deberíamos considerar nuestra existencia en este momento del tiempo algo así como estar en Londres en vez de estar en París.

Sin embargo, algunos teólogos ven problemático un Dios situado fuera del tiempo, porque entonces a éste no le queda sitio para actuar en el mundo. Si optamos por el teísmo y

no por el mero deísmo, Dios necesita gozar de una cualidad temporal para intervenir en el mundo. Si Dios se halla fuera, contemplando el espacio-tiempo en su conjunto, el futuro ya está ahí, es parte del paisaje. Es curioso, pero aunque la gente puede discutir sobre el orden de los sucesos, nunca lo hará si los mismos están vinculados por una relación de causa-efecto. Esto exige un Dios que entra y sale en el tiempo, moldeando la geometría del espacio-tiempo. Pero un Dios que actúa sobre el mundo es un Dios que actúa sobre el tiempo. Así que es muy difícil compaginar un Dios sin tiempo con un Dios que actúa sobre el universo.

La pregunta sigue ahí: ¿qué es eso que llamamos Dios y que se supone que está fuera del tiempo? ¿Puede haber algo que esté fuera del tiempo? Realmente, hay algo que yo consideraría que está fuera del tiempo: las matemáticas. Como todo lo que esté fuera del tiempo, son muy aptas para la tarea de hacer saltar la chispa que creó lo que observamos a nuestro alrededor. Son las creadoras de las ecuaciones de la física cuántica que nos dan el espacio-tiempo y algo a partir de nada. Las matemáticas poseen una característica muy atractiva: no es preciso preguntar quién las creó. Son algo que existe fuera del tiempo y no precisan un momento en el que fueron creadas. Existen y ya está. Quizá deberíamos darle la vuelta al viejo dicho: «Dios es matemático». Quizá las matemáticas son el dios que todo el mundo está buscando. Si sustituimos la palabra *Dios* por *matemáticas* en la propuesta de definición de santo Tomás de Aquino, pienso que funciona bastante bien: «Las matemáticas han de ser consideradas como un ente que existe fuera del dominio del resto de seres existentes, como causa de donde proviene todo lo que existe en diferentes formas».

Esto está próximo a la idea del físico teórico Max Tegmark de la «hipótesis del universo matemático», o MUH, según sus siglas en inglés. Este físico propone que nuestro universo físico es una estructura matemática abstracta. Es una versión

moderna de la filosofía pitagórica. En el artículo en el que presentaba la propuesta de este universo matemático, decía: «Que la MUH fuera cierta, sería una fantástica noticia para la ciencia, ya que abriría la posibilidad de que una elegante unificación de la física, las matemáticas y las ciencias de la computación nos permitiera algún día a los seres humanos alcanzar una comprensión de la realidad más profunda aún de lo que muchos soñaron».

Probablemente yo no iría tan lejos como Tegmark en la identificación de nuestro universo físico con las matemáticas. Parece difícil distinguir entre dos universos en los que sencillamente se han intercambiado las cargas positivas y las cargas negativas. Los dos universos serían diferentes desde el punto de vista de la física, pero su descripción matemática sería exactamente la misma. Éste es un ejemplo de una teoría llamada quidditismo: la idea de que en el universo hay más cosas además de las relaciones entre objetos—qué son (*quid* es la palabra latina que significa ‘qué’) proporciona otro nivel de distinción.

Si las matemáticas son eternas y están fuera del tiempo, no necesitamos un creador para poner en marcha las cosas. Las ecuaciones de las matemáticas se hallan verdaderamente fuera del universo, de modo que podrían muy bien desempeñar el papel de algo sobrenatural y parecido a un dios. No son, sin embargo, un Dios que actúe sobre el mundo, porque ésta sería una visión deísta. Entonces, la cuestión interesante es: ¿cuántas maneras diferentes existen de poner en marcha un universo a partir de un conjunto de ecuaciones matemáticas? Los multiversos surgen ahora de modelos multimatemáticos.

Algunos argumentan que el mero hecho de tener una ecuación que pase de cero unicornios a tres unicornios por segundo no implica que los unicornios existan. O sea, que el tener ecuaciones que hacen posible la física de los quarks y sus interrelaciones con otros campos no hace por sí solo que los quarks sean más reales que los unicornios. Es a lo que se

refiere Hawking cuando habla de la necesidad de comprender cómo «insuflar vida a las ecuaciones». Por ejemplo, ¿qué llevó a nuestro universo a poseer las cargas positivas y negativas colocadas como están en vez de tenerlas intercambiadas? ¿De dónde proviene el «quid» del quidditismo?

Aunque no hubiera universo, ni materia, ni espacio, ni hubiera nada, creo que seguiría habiendo matemáticas. Las matemáticas no precisan del mundo físico para existir. Así pues, según mi punto de vista, son unas candidatas muy firmes para desempeñar el papel de una causa inicial. Esto explica también la «irrazonable eficacia de las matemáticas», expresión que Eugene Wigner acuñó para describir el misterioso don que poseen las matemáticas abstractas a la hora de explicar los fenómenos físicos. Si dichos fenómenos son una consecuencia de las matemáticas, no sería sorprendente que continuemos encontrando explicaciones matemáticas en el núcleo del universo que habitamos.

EL TIEMPO: UNA EXPRESIÓN DE LA INCOMPLETITUD DEL CONOCIMIENTO

Están también los que nos hubieran liberado muy a gusto incluso de la necesidad de hablar del tiempo. Entretanto, mi reloj ha seguido con su tictac. Marca las diez de la noche pasadas. Pero ¿qué significa esto? Si ponemos en un cohete otro reloj que señale la misma hora, a la vuelta ya no coincidirá con el mío.

Los descubrimientos de Einstein revelan que lo máximo que podemos hacer es comparar la marcha de distintos relojes. No hay ningún reloj que mida el tiempo absoluto. Eso no tiene sentido. Si pensamos un poco en ello, la verdad es que siempre ha sido así. ¿Cómo descubrió Galileo que el balanceo de los péndulos es un buen método para medir el tiempo? Estaba en misa observando cómo se balanceaba el candelabro por efecto de las corrientes de aire que recorrían la nave de la ige-

sia. Cuando comparó el ritmo de este movimiento con el de su propio pulso, vio que el tiempo que tardaba el candelabro en completar una oscilación no dependía del ángulo barrido en la misma. Pero aquí Galileo estaba comparando una medida de tiempo con otra que suponía constante. La verdad es que todos estos instrumentos que llevan la cuenta del tiempo dependen siempre de la comparación con otras cosas.

Si volvemos a las ecuaciones de la física, es posible reescribirlas todas sin hacer referencia alguna al tiempo, aunque éste parece desempeñar un papel fundamental. Es como si, al tener una sensación tan viva del paso del tiempo, ésta fuera la mejor ventana a través de la cual observar el mundo. Todos los libros de mecánica tratan el mismo asunto: la evolución del universo con respecto al tiempo. La entrada para la ecuación de la trayectoria de una pelota es el tiempo y la salida nos dice en qué punto se encontrará la pelota en ese tiempo dado. Pero ninguno de esos libros define el tiempo, y ningún físico ha fijado satisfactoriamente lo que queremos decir al referirnos al tiempo, así que quizá la mejor estrategia sería eliminarlo del todo sin más.

Ésta ha sido la intención del físico Julian Barbour. Trabajando sin un puesto académico y manteniendo a su familia con sus traducciones del ruso, Barbour ha desarrollado una versión de la física que elimina por completo la necesidad de recurrir al tiempo. Sus ideas aparecen expuestas en el libro revolucionario *The End of Time* (El fin del tiempo), publicado en 1999: «Nada ocurre: existe el ser pero no el devenir. El paso del tiempo y el movimiento son ilusiones». Una serie de físicos del ámbito universitario se han tomado sus ideas muy en serio.

Pero ¿por qué sentimos entonces que hay algo llamado tiempo, que fluye y que estamos a su merced? Tenemos la sensación de que no podemos volver atrás en el tiempo y de que el futuro está ahí, a la espera. Recordamos el pasado pero no el futuro. El físico italiano Carlo Rovelli y el matemático francés

Alain Connes creen que dicha sensación aparece como resultado de la incompletitud del conocimiento. Conocida como la hipótesis del tiempo térmico, propone que el tiempo es un fenómeno emergente, no un concepto fundamental.

Si tomamos como ejemplo un sistema físico cualquiera, como las moléculas de gas que hay en una habitación, observamos que por lo general no tenemos un conocimiento completo del estado microscópico de estas partículas, sino solamente una descripción macroscópica superficial que sería compatible con muchos estados microscópicos posibles. A causa de nuestro conocimiento incompleto, nos vemos obligados a considerar la situación estadísticamente. Rovelli y Connes han demostrado matemáticamente cómo este conocimiento incompleto puede producir un flujo que tiene todas las propiedades que asociamos con nuestra sensación del tiempo. Creen que el tiempo surge solamente de esta consideración macroscópica de un sistema microscópico desconocido. Si profundizamos lo suficiente, el tiempo desaparecerá, del mismo modo que la idea de superficie de un líquido no tiene sentido cuando nos hallamos a nivel atómico. Igual que es imposible hablar de la temperatura de un átomo o decir que una molécula de agua está húmeda. El tiempo no es fundamental, sino una propiedad emergente análoga a éstas.

Esto no quiere decir que las cosas no sean reales. El calor, la humedad, el tiempo que pasa. Consulto el reloj. Los símbolos 23:55 clavan su mirada en mi rostro. Otro día que concluye. Están a punto de sonar las campanadas de medianoche, anunciando el fin de la fiesta, y me siento un día más cerca del momento en el que ya no podré saber nada más. Pero ¿por qué siento cosas: el paso del tiempo, el dolor de un dedo machacado, el sabor deleitoso de un buen vino, la emoción de escuchar a Prokófiev? Todo esto está en el centro de una de las más grandes cuestiones sin resolver, y posiblemente también irresolubles, de los libros científicos, como descubriremos en la próxima «frontera».

SEXTA FRONTERA:
EL ROBOT PARLANTE

El cerebro es mi segundo órgano favorito.

WOODY ALLEN, *El dormilón*

He descargado en mi teléfono móvil la aplicación Cleverbot, y estoy probándola. El programa intenta convencerme de que es un ser humano. Así que he decidido preguntarle una serie de cuestiones para ponerlo a prueba. He enviado también el texto a un amigo de mi hijo para comparar los resultados, y aquí están las respuestas. ¿Podrá el lector descubrir quién es el humano y quién es el robot parlante?

PREGUNTA 1: ¿Tienes novia?

RESPUESTA A: ¿Quieres que tenga novia?

RESPUESTA B: No te metas en lo que no te importa.

PREGUNTA 2: ¿Cuál es tu sueño?

RESPUESTA A: Mi sueño es convertirme en un poeta famoso.

RESPUESTA B: Ganar mucho dinero.

PREGUNTA 3: ¿Eres consciente?

RESPUESTA A: Si no lo fuese, no creo que...

RESPUESTA B: Es de lo único que estoy seguro.

Resulta que cuanto más juego con Cleverbot, más entreno a la aplicación para que responda como un ser humano. Cada conversación que mantengo con la aplicación es tomada en cuenta y aprovechada en conversaciones futuras, de modo que mis respuestas formarán parte de la siguiente conversación con Cleverbot.

Aunque de las respuestas a mis preguntas hasta el momento no se pueda concluir casi nada, no pasa mucho tiempo has-

ta que Cleverbot pone de manifiesto que le falta mucho para llegar a ser humano. Pero la cuestión de si mi teléfono inteligente llegará alguna vez a ser tan inteligente que tenga conciencia de sí mismo, o de si yo mismo podré realmente asegurar que el amigo de mi hijo es un ser consciente o, por el contrario, solamente una buena simulación, es mucho más intrincada y va hasta el corazón mismo de una de las incógnitas más arduas que aparecen en los libros.

Las dos respuestas a mi pregunta sobre la conciencia aprovechan la famosa declaración de Descartes: «Pienso, luego existo». Ésta fue su respuesta a los escépticos que dudaban de que pudiéramos estar seguros de saber verdaderamente algo sobre el universo. Surgidos de la Academia de Platón en Atenas, los escépticos pensaban que no es posible saber nada con total certeza. El lector piensa que en estos momentos está sujetando un libro, o quizá un dispositivo electrónico, en las manos. Pero ¿está seguro? He cogido los dados que había en mi mesa. Al menos yo creo que los tengo, pero a lo mejor todo es un sueño y no hay ni libro ni dados. Quizá todas nuestras experiencias no son más que un entorno simulado en un ordenador e implantado en nuestro cerebro, como en algunas escenas de *Matrix*. En las *Meditaciones*, Descartes aduce que en todos estos escenarios, de la única cosa que yo puedo estar seguro es de mi propia existencia. Sin embargo, este «yo» podría ser una de las incógnitas más irreductibles.

¿ESTÁS PENSANDO LO MISMO QUE YO?

Hay una cosa que los científicos llaman el «problema difícil de la conciencia». Conciérne a nuestro mundo interior: ¿qué es lo que hace que yo sea yo? ¿Qué es exactamente lo que crea nuestra sensación de conciencia? ¿Cuáles son los ingredientes y el mecanismo que crean la conciencia, y cómo emerge ésta? ¿Cómo puedo saber que mi experiencia consciente comparte las mismas características que la de otra persona?

¿Podré alguna vez meterme en la cabeza de otra persona y experimentar sus mismas impresiones? Después de una noche en la que he bebido en exceso, a la mañana siguiente me duele la cabeza, pero esa sensación ¿se parece mucho a la resaca que otro tiene? Cuando miro uno de los dados de casino, lo veo rojo. Otros llaman a este color de la misma manera y experimentan la misma longitud de onda de la luz, pero ¿lo ven del mismo modo que yo? ¿Tiene siquiera sentido preguntarse esto? Cuando toco el violonchelo, las vibraciones de las cuerdas que llegan a mis oídos y a los de las personas que están conmigo son las mismas, pero ¿podré saber alguna vez si nuestros cerebros están experimentando la misma emoción al escuchar una suite de Bach?

Vivimos en una edad de oro en lo que atañe al problema de la conciencia. En la cuarta «frontera» describí cómo la invención del telescopio permitió a Galileo y a sus contemporáneos indagar en los confines del universo. En la segunda «frontera» vimos cómo la invención del microscopio nos proporcionó una herramienta con la que profundizar en la estructura de la materia. A principios del siglo xx hemos sido agraciados con nuevos telescopios, telescopios de la mente: los escáneres fMRI y EEG permiten a los científicos asomarse a nuestro cerebro y medir la actividad asociada con nuestras experiencias del rojo, del dolor y de los violonchelos.

Sin embargo, que la actividad que observemos en mi cerebro y en el de otra persona sea exactamente la misma no nos garantiza que la experiencia consciente de los dos también lo sea. ¿Por qué no? Estamos configurados de un modo muy parecido, así que ¿por qué no podemos suponer sin riesgo a equivocarnos que nuestros mundos interiores son análogos? Usamos el mismo principio de homogeneidad que es clave en cosmología. Lo que pasa aquí es probablemente lo mismo que pasa en cualquier otro sitio. Y sin embargo, yo solamente puedo apoyarme en mi propia conciencia: un solo dato. ¿No podría ocurrir que mi conciencia fuera diferente y

única, aunque en todas las pruebas pareciera que mi cerebro se comporta exactamente igual que el de otra persona cualquiera? ¿Cómo podría saber alguna vez que yo experimento las cosas de un modo diferente? Quizá los demás ni siquiera tienen conciencia. ¿Cómo podría yo saberlo? El lenguaje ha evolucionado de tal modo que utilizo la palabra *rojo* para describir todas las cosas que la sociedad en la que he crecido dice que son rojas, aunque quizá yo esté experimentando algo completamente distinto que los demás.

Ya sabemos que hay personas que tienen experiencias conscientes de diferente naturaleza cuando oyen un violonchelo o ven el número 2. Las personas que sufren sinestesia comprueban que otros sentidos también resultan estimulados por estas experiencias. Mi mujer experimenta la sensación de un rojo muy oscuro cuando ve el número 9 o la letra s. Mi compositor favorito, Olivier Messiaen, veía colores al escuchar ciertos acordes. El físico Richard Feynman disfrutaba de esa misma experiencia en tecnicolor con las ecuaciones matemáticas. Todas éstas son cosas que nuestros nuevos telescopios de la mente podrían explicar o al menos detectar. Podrían posiblemente captar comportamientos del cerebro genuinamente diferentes. Pero, incluso en el caso de que todas las pruebas muestren que la persona que tenemos enfrente posee un cerebro que muestra la misma actividad que el nuestro, ¿podremos alguna vez saber que dicha persona es verdaderamente consciente o un zombi que representa muy bien el papel de un ser humano consciente? Éste es el problema difícil de la conciencia, para algunos uno de esos problemas cuya respuesta nunca sabremos.

¿DÓNDE RESIDE LA CONCIENCIA?

Muchas de las otras cuestiones que he explorado tienen una rica historia y revelan la gran cantidad de cosas que hemos logrado saber gracias a las investigaciones realizadas a lo lar-

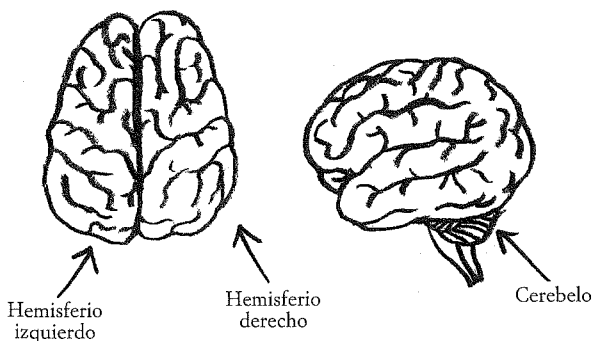
go de los siglos. Pero el problema de la conciencia y de ver lo que pasa en el interior de un cerebro vivo es tan difícil que, hasta el amanecer que supuso la nueva tecnología desarrollada en las últimas décadas, ha sido coto de teólogos y filósofos más que de científicos. Eso no quiere decir que no se haya intentado resolver en el ámbito científico.

La cuestión de dónde está localizado el «yo» es un problema que ha quitado el sueño a los científicos durante siglos. Yo tengo la firme impresión de que mi «yo» está situado en algún punto justo detrás de mis ojos. Siento que es como una versión de mí mismo en miniatura, que está ahí tranquilamente sentado observando el mundo a través de los ojos, como si fuera una pantalla de cine, tomando decisiones sobre las actuaciones del cuerpo que es estuche de mi conciencia. Tengo ciertamente la sensación de que mi conciencia no depende de todo mi cuerpo para existir. Si me cortara una mano, no sentiría que mi conciencia se ha partido en dos. Mi mano no soy yo. Pero ¿cuántos trozos hay que cortar para descubrir lo que me hace ser yo?

No todos han estado convencidos de que el cerebro es la sede de nuestra conciencia. Aristóteles, por ejemplo, pensó que el cerebro es un simple agente enfriador del corazón, donde él creía que residían los sentidos. Pero otros comprendieron que posiblemente el cerebro era la clave de lo que somos. El anatomista Rufo de Éfeso, que vivió en el siglo I, nos dio una de las primeras descripciones físicas del cerebro. Una vez separado el cerebro del cráneo, lo primero que se ve es que consta de dos partes distintas: el cerebro propiamente dicho y, debajo, la versión en pequeño de éste, llamada cerebelo; ambas divididas en dos mitades, que parecen ser imágenes especulares la una de la otra.

Al seccionar el cerebro, vemos agujeros llenos de líquido, los ventrículos. En la Edad Media, los científicos pensaban que estas celdas controlaban diferentes actividades mentales: imaginación en el ventrículo anterior, memoria en

el ventrículo posterior y la razón situada entre los dos. Leonardo da Vinci pensó que el sentido común, el ente que fusionaba los cinco sentidos en una experiencia común próxima a nuestra idea de conciencia, estaba localizado en el ventrículo anterior.



A la izquierda, visión desde arriba del cerebro, en la que se aprecian los dos hemisferios. A la derecha, visión lateral del cerebro, en la que se distingue el cerebelo en la base del cerebro.

Por el contrario, Descartes pensó que si cada cual posee una sola conciencia, deberíamos buscar algo en el cerebro que no tenga una imagen especular, sino que sea una entidad única, y propuso la glándula espinal como sede del alma.

Incluso con un microscopio, es difícil ver qué hace que ese pedazo de materia gris configure la identidad de la persona compleja que está ahora leyendo este libro. Nunca había visto un cerebro humano en directo, y me pregunté si encontrarme con uno cara a cara me ayudaría a descubrir nuevas pistas. Así que visité un sitio que posee la mayor concentración de cerebros del país. No se trata de la universidad de Oxford, sino del Banco de Cerebros de la Sociedad de la Enfermedad de Parkinson del Reino Unido, donde me permitieron tener en mis manos mi primer cerebro, el de un hombre que había muerto hacía poco y que había donado el órgano al banco de tejidos.

El recipiente que lo contenía estaba etiquetado como C33. Pero el contenido de este frasco tuvo antes nombre y apellidos como el lector o como yo. Este cerebro fue en su momento la sede de las esperanzas y los miedos, de los recuerdos y los sueños, de los amores y los secretos del hombre de ochenta y nueve años que decidió donarlo a la ciencia médica antes de morir. Pero ¿dónde está este hombre ahora? Y antes de que este hombre muriera, ¿qué era lo que dentro de este cerebro mantenía activa su experiencia consciente, y qué es lo que se ha detenido?

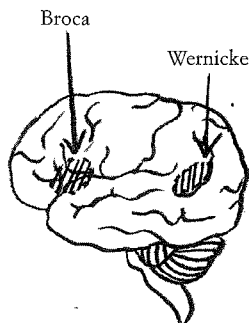
Sólo por tener en mis manos este cerebro, no va ser más fácil ver cómo podía producir esa sensación de experiencia consciente. La creencia de que los ventrículos, esas cavidades llenas de líquido, eran la clave de nuestro mundo consciente, resultó una falacia; sin embargo, la idea de que diferentes zonas del cerebro eran responsables de diferentes funciones se revelaría como acertada.

Los científicos del siglo XIX comenzaron a comprender este hecho—que diferentes zonas del cerebro son responsables de diferentes funciones—analizando cerebros que, por daños o lesiones, no funcionaban correctamente. Por ejemplo, la parte frontal del cerebro es la responsable de la resolución de problemas, de la toma de decisiones y del comportamiento social y sexual. La zona intermedia se ocupa de las sensaciones, de la percepción y de la integración de los datos aportados por los sentidos. La parte trasera es como la pantalla de cine responsable de la percepción visual, lo que explica en parte por qué la sensación de que mi conciencia descansa justo ahí, disfrutando de la película de mi vida.

¿Qué se puede decir de los dos hemisferios? Se ha especulado mucho sobre el papel que desempeña cada uno de ellos, pero investigaciones recientes han probado que el cerebro es quizá más adaptable y flexible de lo que algunos habían pensado. Dicho esto, se sabe que el centro del lenguaje se aloja principalmente en el hemisferio izquierdo. El médico fran-

cés del siglo XIX Paul Broca analizó los cerebros de pacientes que habían perdido la capacidad del habla y descubrió que todos ellos tenían lesiones en una misma zona, llamada ahora el área de Broca. Algunos años más tarde, en 1874, el médico alemán Carl Wernicke propuso la hipótesis de que las lesiones en otra zona diferente del cerebro provocaban a los pacientes problemas para comprender el significado del lenguaje (no en la articulación de palabras). Localizada en la parte trasera del hemisferio izquierdo del cerebro, esta zona se conoce ahora como el área de Wernicke.

Asimismo, el hemisferio izquierdo es el responsable de los cálculos numéricos que tengo que realizar para determinar las probabilidades asociadas a los distintos resultados de las tiradas de dados. Es el lugar donde se procesan los números. El hemisferio derecho, por su parte, es el responsable de procesar el sonido de mi violonchelo y de escuchar la música, y también de imaginar figuras geométricas como mi modelo de papel del universo en forma de icosaedro. Para funcionar con más eficacia, los dos hemisferios del cerebro están en comunicación permanente a través del cuerpo calloso que los divide. Se comunican entre sí a través de fibras nerviosas que recorren esa unión. Éste es un rasgo de diseño curioso, que produce casi un embotellamiento en la comunicación cruzada.



Aunque está claro que cortarle a alguien una mano no alterará su sentido de la conciencia, ¿qué pasa si cortamos un cerebro en dos? Como la conciencia es el resultado de la actividad cerebral, si cortamos el cuerpo calloso, de modo que los dos hemisferios no puedan comunicarse entre sí, ¿qué le pasa a la conciencia? ¿Se divide en dos?

LA DIVISIÓN DE LA CONCIENCIA EN DOS

Hay una operación quirúrgica que consiste precisamente en seccionar el cuerpo calloso. Fue llevada a cabo por primera vez en la década de 1940 en pacientes vivos con el fin de controlar los ataques epilépticos. Un ataque epiléptico consiste esencialmente en la activación simultánea de un gran número de neuronas por todo el cerebro. Una oleada de actividad eléctrica barre el cerebro, provocando al paciente el ataque. La teoría era que un corte en el cuerpo calloso ahorraría al menos a uno de los hemisferios estas intensas oleadas de energía. Pero ¿qué efectos tuvo esta operación quirúrgica para la conciencia?

Hay pruebas fiables que apuntan a que el cuerpo aloja en ese caso dos conciencias distintas. Como cada hemisferio del cerebro se dedica al comportamiento físico del lado opuesto del cuerpo, puede observarse esta conciencia escindida en el contraste entre el comportamiento de un lado del cuerpo y el del otro. Existe una grabación extraordinaria de un paciente que sufrió una de estas operaciones de cirugía de cuerpo calloso, en la que se ve cómo la parte izquierda del cuerpo ataca físicamente a la parte derecha. La parte izquierda del cuerpo, que está controlada por el hemisferio derecho del cerebro, no tiene acceso a la parte del cerebro que se ocupa del lenguaje, localizada en el hemisferio izquierdo, de modo que es incapaz de expresarse verbalmente. Esta frustración es la que parece haberse manifestado en el ataque. Finalmente, al paciente se le administraron fármacos con el fin de adorme-

cer el hemisferio derecho y dejar que fuera el izquierdo el que dominara la situación.

Es difícil determinar si en realidad esto revela que existe una conciencia alojada en el hemisferio derecho que puede revolverse contra otra alojada en el hemisferio izquierdo. Estas reacciones podrían ser respuestas físicas sin conexión con experiencia consciente alguna, igual que cuando al golpear suavemente la rodilla con un martillo se produce un acto reflejo involuntario.

Otro experimento notable que apoya la idea de que hay dos identidades funcionando dentro de un mismo cuerpo tiene que ver con el proceso de contar. Se colocó una pantalla entre un paciente que había sufrido una cirugía de cuerpo calloso y una mesa en la que se colocarían diversas series de objetos. El paciente podía introducir la mano derecha o la izquierda a través de un agujero practicado en la pantalla para contar cuántos objetos había en la mesa en aquel momento.

Si el paciente usaba la mano derecha, acertaba el número de objetos. Pero ocurrió algo muy curioso al usar la izquierda: cuando el experimentador le pedía que dijera en voz alta el número de objetos que había encontrado, las respuestas eran completamente aleatorias y generalmente incorrectas. El hemisferio cerebral correspondiente al lenguaje (el izquierdo) que decidía qué número había que decir, no tenía acceso a la mano izquierda (controlada por el hemisferio cerebral derecho) y por eso hablaba al azar.

Sin embargo, cuando el experimentador pidió al paciente que le indicara con los dedos el número de objetos que había encontrado, éste no tenía problema en mostrar el número correcto. Un hemisferio del cerebro podía articular el habla pero tenía que decir el número al azar; el otro hemisferio solamente podía usar el lenguaje de signos pero tenía acceso a la respuesta correcta. Esto parece menos explicable en términos de simples actos reflejos en respuesta a estímulos externos.

De nuevo, vemos que el hemisferio derecho podría seguir siendo capaz de funcionar inteligentemente, pero quizá tenemos aquí el caso de un zombi, sin ningún mundo consciente interior, que sigue siendo capaz de funcionar como un ser consciente. ¿Cómo podemos saber en qué caso estamos? Y de todos modos, ¿por qué restringir la conciencia al hemisferio izquierdo, que es el que genera el lenguaje?

Los cerebros escindidos parecen incapaces de unificar la información como lo hacen los cerebros conectados. Si mostramos al ojo izquierdo la palabra *llave* y al ojo derecho la palabra *aro*, la persona dirá en alto la palabra *aro* y podrá señalar con la mano izquierda un dibujo de una llave, pero será incapaz de unir ambas palabras para formar el concepto «aro para llaves» o «llavero». Pero ¿es esto un ejemplo de dos conciencias o simplemente una prueba de que un cerebro escindido falla a la hora de formular una conexión cognitiva?

Muchos pacientes que han sufrido una cirugía de cuerpo calloso son capaces de desenvolverse perfectamente. Pueden conducir, trabajar y comportarse normalmente en las reuniones sociales. Entonces, ¿son los dos hemisferios capaces de integrarse o es éste un ejemplo de dos conciencias que actúan con éxito en tándem, esencialmente dos copias idénticas en la que una imita el comportamiento de la otra?

La conciencia recoge toda la información aportada al cerebro por los sentidos y la integra en una sola experiencia. En el caso de los pacientes que han sufrido una cirugía de cuerpo calloso, el cerebro es incapaz de hacer esto. Pero quizá hay también cerebros que, sin haber sufrido esta cirugía, tienen dificultades para integrar la actividad del cerebro en una experiencia unificada. Quizá desórdenes como la esquizofrenia o la doble personalidad son causados por un cerebro que no sabe integrarlo todo en una sola voz. El resultado es que da la sensación de que hay más de un ser consciente dentro del cerebro.

Aunque estos cerebros dañados ayudaron a los neurobió-

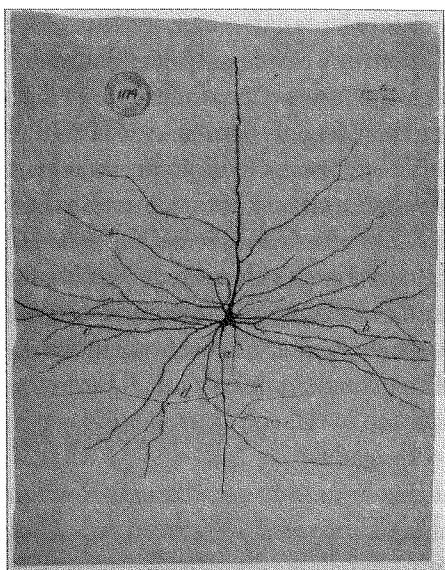
logos a comprender cómo ciertas zonas del cerebro están asociadas a ciertas funciones, el avance real en la comprensión de la arquitectura del cerebro llegó a finales del siglo XIX, con los trabajos del científico español Santiago Ramón y Cajal.

ENCENDIÉNDOSE Y APAGÁNDOSE

Nacido en 1852, cuando era niño Ramón y Cajal quería ser artista, pero a su padre esta profesión no le parecía muy adecuada. Pensaba que estudiar medicina era mucho más provechoso y se le ocurrió una estrategia algo extravagante para despertar e incentivar la vocación de su hijo por los estudios de medicina: llevarlo a los cementerios en busca de restos humanos. Usando lo que encontraban, Ramón y Cajal satisfacía sus dotes artísticas dibujando diagramas de los huesos que habían desenterrado, pero el plan de su padre tuvo éxito y el hijo se entusiasmó cada vez más con la anatomía humana que dibujaba. Recibió su diploma de doctor en medicina en 1877.

Diez años más tarde, Ramón y Cajal descubrió un modo de combinar su amor por el arte y su amor por la anatomía. Siendo profesor en la universidad de Barcelona, le llegaron noticias de una nueva técnica, a base de nitrato de plata, que podía revelar la estructura de las células nerviosas. Aplicando esta técnica a las células del cerebro, proporcionó algunas de nuestras primeras visiones de la naturaleza verdaderamente extraordinaria y compleja de esta parte de nuestra anatomía. Usando nitrato de plata, podía teñir células individuales del cerebro para desvelar su estructura. Los resultados eran inesperados y muy bellos.

Ésta es una de las primeras imágenes de una neurona. Es una célula de la retina humana. Fue el primer indicio de que el cerebro no era una estructura continua, sino que estaba compuesto de células discretas interconectadas, llamadas neuronas.



Al ir tiñendo cada vez más células de distintas zonas del cerebro, Ramón y Cajal descubrió neuronas de diferentes formas y tamaños. Usando sus habilidades artísticas, llenó sus libretas de dibujo con el complejo abanico de estructuras, documentándolas como lo hubiera hecho un coleccionista de mariposas. Ahora sabemos que hay del orden de 86 mil millones de neuronas en el cerebro humano: a un ritmo de una por segundo, tardaríamos más de 2.700 años en contarlas. Aunque las neuronas se presentan con formas y tamaños muy diversos, como testimoniaron los dibujos de Ramón y Cajal, tienen todas una estructura subyacente muy parecida, que consiste en una célula central llamada soma, a partir del que se extienden en todas direcciones ramas llamadas axones y dendritas.

¿Cómo funciona en realidad una neurona? Una neurona se conecta o se enciende como si fuera un interruptor. Por ejemplo, si mis oídos captan un cambio en la presión del aire cuando toco el violonchelo, se inicia un cambio molecular

en la neurona, que hace que una corriente eléctrica recorra la célula. Esta neurona puede entonces comunicarse con otra neurona a través de unas conexiones que se llaman sinapsis. Cada neurona tiene un axón que sale de la célula y que es una especie de cable eléctrico a lo largo del cual viaja la información hacia otras neuronas. Este axón está conectado con las dendritas de otras neuronas a través de las sinapsis. La actividad eléctrica de una neurona puede producir una reacción química en una de las sinapsis conectada a otra neurona, que hace que ésta se encienda. El cerebro funciona de un modo muy parecido a un ordenador o a un teléfono inteligente con aplicaciones como la del robot parlante: las neuronas están encendidas o apagadas.

Es verdad que hay cosas que distinguen al cerebro de un ordenador. Hay factores análogos en funcionamiento a la hora de determinar la activación de una neurona. El flujo químico a través de la sinapsis debe superar cierta tasa crítica para desencadenar el encendido de la neurona vecina. El ritmo de activación de las neuronas es tan importante para la transmisión de información como su activación misma. Dicho esto, estas células neuronales discretas conectadas por cables que hacen que se activen o no son sumamente inspiradoras a la hora de considerar la posibilidad de crear una conciencia artificial en algo como un teléfono móvil. Pero la evolución ha diseñado en nosotros una red extremadamente complicada. Cada axón puede estar conectado con 1.000 dendritas diferentes. Esto puede parecer mucho, pero dado que el cerebro tiene 86 mil millones de neuronas, cada neurona individual está de hecho conectada solamente con una pequeña fracción del cerebro.

Es esta actividad eléctrica y química la que produce la actividad cerebral, y su pérdida puede engendrar problemas y patologías. El hombre de ochenta y nueve años cuyo cerebro sostuve entre las manos en el Banco de Cerebros de la Sociedad de la Enfermedad de Parkinson del Reino Unido sufría

la enfermedad de Alzheimer, que es un resultado directo de la pérdida de neuronas y sinapsis.

Podemos abrir un cerebro, teñir sus células con nitrato de plata y montar un mapa estático de la red, pero ¿cómo podemos conseguir una visión de la actividad dinámica de un cerebro vivo? La circunstancia que ha revolucionado el estudio del cerebro es la posibilidad de mirar lo que pasa dentro del mismo al realizar ciertas tareas. El estudio del cerebro ha progresado notablemente gracias a los nuevos avances tecnológicos.

TELESCOPIOS NEURONALES

La manera más sencilla y más rápida de hacerse una idea de la actividad cerebral es usar una electroencefalografía (EEG). La primera vez que me escanearon el cerebro con la EEG estaba un poco nervioso. Aquello parecía una especie de extractor de cerebros alienígena. Siguiendo un proceso bastante largo, que parecía incluir el lijado y pulido de mi calva para establecer buenas conexiones, me colocaron 64 electrodos en la superficie de la cabeza que, aunque no eran para extraerme el cerebro, sí que permitían el acceso a parte de mis procesos mentales.

Desarrollada por el fisiólogo alemán Hans Berger en la década de 1920, la electroencefalografía (es mucho más fácil llamarla EEG) usa los electrodos para registrar la actividad eléctrica a lo largo y ancho del cuero cabelludo. La EEG mide las variaciones de voltaje que resultan de las corrientes eléctricas que fluyen entre las neuronas del cerebro. Usando la EEG, los científicos localizaron diferentes tipos de ondas que correspondían a diferentes tipos de actividades cerebrales. La actividad sincronizada de gran número de neuronas produce oscilaciones macroscópicas de diferentes frecuencias, que corresponden a diferentes estados cerebrales.

La banda de frecuencias que primero se descubrió y que

es la más conocida incluye las llamadas ondas alfa, que es la actividad sincronizada de un gran número de neuronas que provoca oscilaciones macroscópicas de 8-12 hercios. Es una frecuencia mucho más baja que la de las notas producidas por mi violonchelo, la más baja de las cuales vibra a 65 hercios. Sin embargo, esto se parece mucho a una nota musical que esté sonando en mi cerebro. Las ondas alfa pueden detectarse en la parte trasera del cerebro cuando uno está despierto pero relajado, y aumentan al cerrar los ojos. Éstas no son las únicas notas que produce el cerebro, y hay ondas con otras frecuencias que aparecen en distintos períodos de la actividad cerebral:

—Las más lentas son las ondas delta, con frecuencias de 1-4 hercios, que están asociadas al sueño profundo, inconsciente y sin sueños.

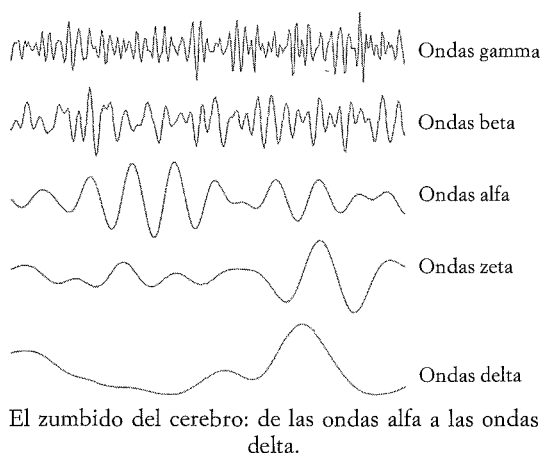
—Vienen después las ondas zeta, con frecuencias de 4-8 hercios, asociadas al sueño ligero o a la meditación.

—Más rápidas aún son las ondas beta, que vibran a 13-30 hercios, y que son las que emite el cerebro cuando está completamente despierto.

—En cuanto a la capacidad del cerebro para crear conciencia, las más importantes son supuestamente las ondas gamma, que vibran más rápidamente, a 30-70 hercios, frecuencias que pisan justamente el umbral del rango de notas que puede producir el violonchelo. Las ondas gamma están asociadas con la formación de ideas, el lenguaje y la memoria, y con diversos tipos de aprendizaje.

Parece que el cerebro, a lo largo del día y de la noche, actúa como una orquesta que tocara una sinfonía, pasando de movimientos rápidos a movimientos lentos, con algún *scherzo* ocasional cuando generamos nuevas ideas o nos enfrentamos a situaciones nuevas.

Las señales de la EEG cambian drásticamente durante el sueño y muestran una transición desde frecuencias rápidas hacia frecuencias cada vez más lentas, como las ondas alfa.



De hecho, las diferentes etapas del sueño están caracterizadas por la diferencia de frecuencia entre las ondas que recorren el cerebro, y ésta es la razón por la cual fue posible relacionar dichas oscilaciones neuronales con estados cognitivos como la percepción consciente y la conciencia. Por ejemplo, los médicos diagnostican la muerte cerebral de un paciente cuando la EEG no detecta ninguna onda. Parece que las ondas internas del cerebro se ocupan de sincronizar el cerebro para que éste funcione de la manera más eficiente posible.

Aunque la EEG proporciona a los científicos un acceso rápido a la actividad cerebral, el escáner fMRI, desarrollado en la década de 1990, es probablemente la más conocida de las nuevas herramientas para observar lo que pasa dentro del cerebro. Comparada con la modesta EEG, el escáner fMRI es un monstruo. Aunque parece una cápsula de hibernación espacial, una vez que uno entra ahí es prácticamente imposible dormir. El ruido de los imanes en funcionamiento es tan intenso que tuve que usar tapones para los oídos cuando estuve dentro del escáner. La experiencia no es dolorosa, pero cuando a uno le escanean el cerebro con una fMRI, es

preciso permanecer inmóvil durante una cantidad inhumana de tiempo dentro del aparato, porque en caso contrario es imposible conseguir una imagen clara de lo que ocurre en el interior de la cabeza.

El escáner funciona detectando los cambios en la oxigenación y el flujo de la sangre producidos en respuesta a la actividad neuronal. Cuando una zona del cerebro está más activa, gasta más oxígeno. El incremento en el fluido de sangre hacia la zona activa puede ser detectado porque la sangre oxigenada es más magnética. El escáner fMRI puede detectar esta fluctuación magnética, lo que es posible usar después para crear mapas de activación que muestran qué partes del cerebro están involucradas en un proceso mental concreto.

Al contrario que el escáner fMRI, que detecta un rasgo secundario, la EEG proporciona una medida mucho mejor de lo que pasa en el cerebro puesto que determina la actividad cerebral real a través del cambio de comportamiento eléctrico. La capacidad de la EEG para registrar cómo cambia la actividad del cerebro con el tiempo no puede ser igualada en estos momentos por los escáneres fMRI. La ventaja del escáner fMRI es que genera una instantánea del cerebro en alta definición. Así pues, la combinación de ambos aparatos nos proporciona una buena descripción del cerebro en acción. Por ejemplo, tanto la EEG como el escáner fMRI pueden identificar la zona específica del cerebro que se activa cuando uno piensa en cuestiones matemáticas. ¿Podremos entonces usar estos telescopios neuronales para ver la conciencia? De momento, esto escapa de nuestros límites. La cuestión es que a lo mejor no hay nada que ver.

¿ES MI GATO CONSCIENTE?

Aunque comprendamos qué parte del cerebro se activa cuando realizamos una u otra actividad, y cómo funciona la física y la química del cerebro, eso todavía no nos permite entender

en gran medida nuestro sentido del «yo». ¿Cómo podríamos abordar este tipo de cuestiones? Una estrategia muy poderosa que utilizan los matemáticos para entender un asunto es tratar primero de entender aquello que no es.

Por ejemplo, a pesar de todos los esfuerzos que el robot parlante ha hecho para convencerme de lo contrario, no creo que mi teléfono móvil sea consciente, como tampoco creo que lo sea la silla sobre la que estoy sentado. ¿Y los animales? Antes de irse de casa, mi gato blanco y negro *Freddy* se sentaba en mi despacho y hacía vida relajada mientras yo sudaba escribiendo cosas de matemáticas. Pero ¿tenía conciencia de sí mismo? ¿Y los bebés? Según fueron creciendo mis hijos, sus cerebros evolucionaron, y con ellos sus conciencias y su sentido de la autopercepción cambió. ¿Será que podemos identificar diferentes niveles de conciencia? ¿Hay umbrales en el desarrollo del cerebro a partir de los cuales emergen diferentes estados de conciencia?

Por supuesto, preguntar a un animal como mi gato sobre su mundo interno supone un grave problema. A finales de la década de 1960, Gordon Gallup, especialista en comportamiento animal, se estaba afeitando frente al espejo, ponderando la cuestión de cómo evaluar la autopercepción en los animales, cuando tuvo repentinamente una idea. Él era consciente de que la cara que veía en el espejo era la suya, pero se preguntó qué animales saben que lo que ven en un espejo no es otro animal, sino una imagen de ellos mismos.

Una revisión de unos cuantos vídeos de gatos, entre los casi infinitos que hay en internet, revela que éstos tienden a pensar que la imagen que les devuelve un espejo corresponde a un gato rival presente en la habitación. Pero ¿cómo podemos estar seguros de que un animal se da cuenta de que la imagen que ve es la suya? Gallup descubrió un método muy fiable para comprobar qué especies se reconocen a sí mismas en el espejo, lo que a su vez indica que tienen efectivamente un sentido de ser ellas mismas.

Su método es sencillo. Se coloca al animal ante el espejo hasta que se familiariza con su reflejo. (Hay grabaciones fascinantes de chimpancés que danzan excitados a la vez que su reflejo ante el espejo. Pero ¿piensan que bailan con otro chimpancé o se admiran de sus propios movimientos?). En un momento dado, el experimentador aparta al animal, y a la vez que le frota la cara, le pinta subrepticamente una marca roja debajo del ojo, de modo que el animal no se percata de la marca y solamente puede percibirla si se mira en el espejo. Gallup quería saber cómo reaccionaría ahora el animal al ver su imagen en el espejo.

Si uno de nosotros se mira en el espejo y ve algo extraño en la mejilla, su reacción inmediata es tocar la marca para investigar qué puede ser. La prueba del espejo de Gallup, como se ha dado en llamar, revela el asombroso hecho de que los humanos formamos parte de un grupo muy pequeño de animales que pasan sistemáticamente este test de conciencia o autopercepción. Gallup solamente encontró otras dos especies que reaccionaban de un modo parecido a los humanos: los orangutanes y los chimpancés. Una tercera especie se añadió a la lista después de la publicación en 2001 del trabajo de investigación de Diana Reiss y Lori Marino sobre los delfines nariz de botella.

Aunque los delfines no tienen manos con las que tocarse la marca, pasaban mucho más tiempo frente a sus imágenes en el espejo, dentro de la piscina, cuando habían sido marcados. No manifestaban ningún interés por las marcas de otros delfines que compartían con ellos la piscina, lo cual apuntaba a que tenían cierta conciencia de que el delfín que veían en el espejo no era simplemente otro delfín. Además de los orangutanes, los chimpancés y los delfines, hay indicios sólidos de que otros animales han superado individualmente la prueba, como una urraca inteligente y un elefante. Pero ciertamente, no hay ninguna otra especie que supere la prueba de modo sistemático.

Resulta chocante que los chimpancés empiecen a fallar en la prueba cuando alcanzan los treinta años, a pesar de que todavía les quedan diez o quince de vida. La razón podría ser que la conciencia de ser uno mismo tiene un precio. La conciencia le permite al cerebro embarcarse en viajes en el tiempo mentales. Se puede pensar en uno mismo en el pasado y también proyectarse al futuro. Por eso Gallup cree que en la última etapa de su vida los chimpancés prefieren perder esa habilidad de ser conscientes de ellos mismos. El precio que se paga por ser consciente de la propia existencia es que hay que enfrentarse a la inevitabilidad del futuro fallecimiento. La conciencia de la muerte es el precio que pagamos por ser conscientes de nuestra identidad. Esto plantea la interesante cuestión de si la demencia en los seres humanos desempeña un papel parecido, protegiendo a los humanos de edad avanzada del doloroso reconocimiento de su muerte inminente.

Por supuesto, la prueba del espejo es un modo de medir la conciencia muy tosco. Tiene un sesgo hacia las especies con el sentido de la vista muy desarrollado. Los perros, por ejemplo, no tienen muy buena visión, sino que se sirven del olfato para reconocer a otros perros, así que no se podía esperar que un perro pasase una prueba de autoconciencia aunque tuviera un sentido de sí mismo igual de bien desarrollado. Incluso en aquellas especies para las que la vista es el sentido primordial a la hora de relacionarse con el mundo, se trata de una prueba de autoconciencia muy rudimentaria. No obstante, tiene consecuencias sorprendentes cuando se aplica a los seres humanos, ya que puede ser usada para descubrir cuándo el cerebro sufre la transformación que hace que empiece a reconocer su propia imagen en el espejo.

No creo que mis hijos, cuando eran bebés, tuvieran el mismo sentido de sí mismos que tienen ahora. Pero ¿en qué momento hubieran empezado a reaccionar como los chimpancés a una marca hecha subrepticamente sobre su cara? Resulta que un niño de dieciséis meses sigue jugando enfrente

del espejo ajeno totalmente a la nueva marca, aunque podría alargar la mano hasta el espejo para investigar esa imagen algo inusual.

Pero si colocamos a un niño de veinticuatro meses frente al espejo, veremos que se lleva la mano a la cara inmediatamente para explorar esa mancha extraña. Esta reacción enérgica indica que el niño de veinticuatro meses reconoce la imagen y piensa: «Ése soy yo». Algo ocurre en el cerebro durante su desarrollo que provoca que se haga autoconsciente, pero qué es exactamente sigue siendo un misterio.

Si la conciencia surge en los humanos a los dieciocho-veinticuatro meses, podemos hacernos la misma pregunta a escala cósmica: ¿cuándo surgió la conciencia por primera vez en el universo? Seguramente nada pudo evolucionar tanto como para ser considerado consciente al poco tiempo de la Gran Explosión. Así que debió de haber un momento en el que se produjo la primera experiencia consciente. De modo que la conciencia probablemente tiene una naturaleza distinta a la gravedad o el tiempo, aunque todavía sigue estudiándose hasta qué punto aquélla es una noción emergente o fundamental.

El psicólogo estadounidense Julian Jaynes, fallecido en 1997, propuso la hipótesis de que el surgimiento de la conciencia en los seres humanos puede ayudar a explicar la creación del concepto de Dios. La evolución de la conciencia trajo aparejada la sensación progresiva de que había una voz en nuestras cabezas. Quizá, sugirió Jaynes, Dios apareció al tratar de dar un sentido a este incipiente mundo interior.

Al leer estas palabras, el lector probablemente tendrá la sensación de que resuenan en su cabeza. Esto es parte de nuestro mundo consciente. Aunque dichas palabras no suenan en alto ni son oídas por otras personas, forman parte de nuestro mundo consciente, y son solamente nuestras. Jaynes creyó que, al evolucionar y surgir la conciencia, la impresión que supuso esa voz dentro de nuestras cabezas podría haber

dado origen a la idea de una inteligencia trascendente, algo que no es de este mundo, y que esto condujo al cerebro a interpretar la como la voz de Dios.

Esta idea de que nuestro mundo interior está próximo al concepto trascendente de Dios es central en muchas prácticas religiosas orientales, incluida la tradición védica. Brahman, el ser trascendente supremo de la religión hindú, se suele identificar con *ātman* o el concepto de uno mismo.

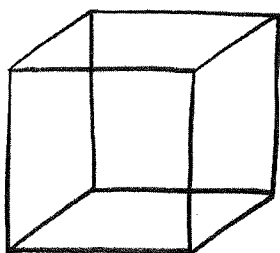
Como dato curioso, Jaynes creyó que podemos datar de hecho el nacimiento de la conciencia en la evolución humana. Él lo sitúa en algún punto del siglo VIII a. C., entre la creación de la *Iliada* y la de la *Odisea* de Homero. En la *Iliada* no hay rastro de mundo interior en los protagonistas, ni de introspección o de conciencia. Los personajes del asedio de Troya actúan simplemente movidos por los dioses. En la *Odisea*, por el contrario, vemos que Odiseo es claramente introspectivo, consciente de sí mismo, consciente de un modo nuevo muy diferente al de los personajes de la *Iliada*.

ILUSIONES DE LA MENTE

Uno de los placeres de leer un libro como la *Iliada* o la *Odisea* es el de la inmersión en otro mundo. Un buen libro puede hacer que uno se olvide del entorno. El cerebro se ha convertido en un ente muy hábil para filtrar todo lo que llega a nuestra conciencia. Lejos de nosotros ser conscientes del espectro completo de información sensorial que recibimos: eso sería demasiado abrumador. Pero es llamativo que el cerebro pueda alternar entre una percepción consciente y otra distinta sin que medie ningún cambio en las condiciones externas.

Mi ejemplo favorito de este cambio de conciencia es la reacción del cerebro ante un esquema de mi dado de casino. ¿Qué vemos aquí?

Al principio parece que es un cubo con una de sus caras cuadradas delante, más cerca de nosotros. Pero de repente,



cuando estamos mirándolo, el cubo cambia y parece que es otra de las caras cuadradas la que está delante, más cerca de nosotros. Se llama el cubo de Necker, y no es la imagen la que ha cambiado, sino nuestra percepción consciente de ella. ¿Qué ha ocurrido en el cerebro? ¿Es la conciencia realmente sólo una historia que el cerebro se inventa a partir de la información sensorial que recibe gracias a las interacciones del cuerpo con el mundo?

El neurólogo Christof Koch me mostró otro ejemplo chocante de cómo el cerebro procesa a veces los datos visuales de modo sorprendente. Koch es una de las figuras más destacadas en las investigaciones modernas de la conciencia. Durante años, la conciencia no era tema adecuado para un científico respetable. Era un coto reservado a los departamentos de humanidades, y no para los laboratorios. Pero cuando el Premio Nobel Francis Crick pasó de investigar el ADN a explorar la cuestión de cómo el cerebro genera la conciencia, se convirtió súbitamente en un tema que se consideraba adecuado y serio para un científico. Cuarenta años más joven, Koch era el colaborador de Crick en este proyecto de investigación.

Mi primer encuentro con Koch fue en la cima del monte Baldy en Pasadena, a un paso de Caltech, donde él trabajaba en aquel momento. Decidimos vernos allí porque caía en mitad de una de las épicas carreras de montaña que a Koch le gusta hacer. Me avergüenza decir que decliné su invitación para acompañarle en su recorrido y que hice trampa subien-

do a la cumbre en el telesilla. Antes de enzarzarnos en el espinoso problema de la conciencia, no pude evitar distraerme con el tatuaje que exhibe en el hombro. Parecía el logo de la manzana arcoíris mordida usado por la compañía de ordenadores Apple.

—Pedí que me lo hicieran en 2000, cuando estaba en Israel, en unas excavaciones arqueológicas, con mi hijo. El ordenador Apple es uno de los artefactos más bellos y elegantes del siglo XX. Un maridaje perfecto entre forma y función.

Creo que piensa que será tan significativo para entender la cultura actual como las vasijas que ayudó a desenterrar con su hijo lo son para apreciar la Cesarea de Herodes en el año 20 a. C. Koch habla mucho de su ordenador Apple y se pregunta constantemente si algún día podrá ser consciente y responderle. Su otro amor son los perros, de los que piensa que son mucho más conscientes de lo que solemos aceptar. Fue su creencia en la conciencia de los animales lo que le impulsó a hacerse vegetariano.

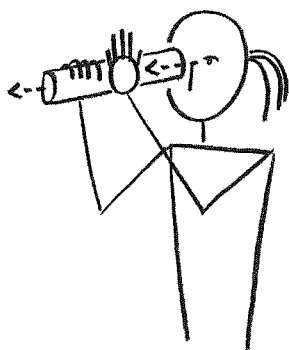
—Es muy probable que los mamíferos sean conscientes de los dolores y placeres de la vida, que puedan estar contentos o tristes, y por eso no deberíamos comer su carne. Fue difícil traducir inmediatamente esta convicción creciente en una acción coherente, porque el sabor de la carne lo tenemos muy arraigado.

La especialidad de Koch, dentro de las ciencias neurológicas, es la visión, y con una hoja de papel que llevaba en el bolsillo me ilustró cómo la visión nos proporciona algunas ideas interesantes sobre la manera en que las cosas acaban llegando a nuestra mente consciente.

Koch me dio aquel folio y me pidió que lo enrollara en forma de cilindro para construir un telescopio. Entonces me dijo que me lo acercara al ojo derecho y que mantuviera también abierto el ojo izquierdo, y colocó mi mano izquierda abierta a cierta distancia de mi ojo izquierdo.

—Ahora mira hacia aquellas montañas de allá. ¿Qué ves?

Cuando miré a través del telescopio, no podía parar de reír. ¡Parecía que tenía un agujero en la mano!



Koch me explicó que el cerebro trata de procesar dos lotes de información que parecen ser inconsistentes con la experiencia. Así que lo que llega a mi cerebro consciente es una fusión de las cosas en las que piensa que estoy interesado. De modo que veía parte de mi mano izquierda con la información que llegaba de mi ojo izquierdo, pero también el pequeño círculo central con la imagen de las montañas lejanas que llegaba de mi ojo derecho. Al superponer ambas imágenes, parecía que tenía un agujero en la mano. Koch piensa que estudiar cómo el cerebro decide lo que llega o no a la conciencia podría ayudarnos a entender mejor la conciencia misma.

¿Cómo podemos entonces utilizar nuestros nuevos telescopios neuronales para saber qué ocurre cuando nuestro cerebro adquiere conciencia de uno u otro hecho? Según las investigaciones de Koch, parece que los nervios de la retina no envían información diferente, así que el cambio en la experiencia consciente ha de estar produciéndose más profundamente en su camino hacia el cerebro. El problema es que los escáneres fMRI y EEG no son tan precisos como para detectar el salto entre una de las visiones del cubo de Necker y la otra. Pero en 2004 Koch, con su equipo de Caltech, vio

una oportunidad de someter a preguntas a una neurona determinada para ver qué le hacía activarse, lo que condujo al descubrimiento de algunas actividades neuronales curiosas.

LA «NEURONA JENNIFER ANISTON»

Los ataques epilépticos pueden ser causados por una conexión defectuosa o cicatriz, que sería la responsable de desencadenar la activación sincronizada de un gran número de neuronas a lo largo del cerebro, algo parecido a la reacción en cadena tras la explosión de una bomba atómica. En algunos casos, seccionar una pequeña porción del cerebro puede evitar esos ataques, eliminando el disparador que pone en marcha el efecto cascada.

Para dilucidar dónde se encuentra la fuente del ataque, y con el fin de no eliminar demasiado tejido, a los pacientes se les insertan unos veinte electrodos en el tejido blando del cerebro a través de orificios practicados en el cráneo. Parece un método de tortura medieval, pero es un procedimiento que forma parte de la práctica médica cotidiana. Cada electrodo posee unos cables salientes finos como cabellos que establecen conexión con una zona de entre 10 y 50 neuronas. Si alguna de estas neuronas se enciende, la correspondiente actividad eléctrica es recogida por el electrodo. El cirujano espera entonces a que al paciente le dé un ataque, momento en el que se puede hacer el recuento y registro de las neuronas que se activan a lo largo del cerebro, y un análisis matemático posterior de los datos recogidos señala la fuente posible del ataque.

No obstante, el ataque puede tardar en llegar, y durante ese tiempo los pacientes, erizados de cables, esperan en la sala de brazos cruzados. El equipo de Caltech vio entonces una oportunidad. ¿Por qué no aprovechar esta situación para interrogar a los pacientes y ver qué hace que las neuronas se activen? La región del cerebro que es la fuente más

común de ataques es también el área en la que se acumulan los recuerdos. Como era aquí donde estaban situados casi todos los electrodos, decidieron ver cuál era la actividad eléctrica que quedaba registrada cuando se activaba algún recuerdo. Para provocar esos recuerdos, al paciente se le iba mostrando una serie de fotografías.

Los tanteos llevaron algún tiempo, pero los resultados fueron llamativos. En un caso, las neuronas solamente se activaban al ver fotos de la actriz Jennifer Aniston. No importaba que estuviera vestida de otro modo o que tuviera el pelo de otro color, la neurona parecía activarse al reconocer el concepto «Jennifer Aniston». Incluso se activaba cuando se le mostraba al paciente simplemente el nombre de la actriz escrito en un papel.

En cierto sentido, el descubrimiento no era tan sorprendente. Para codificar recuerdos, ideas y conceptos, el cerebro tiene que encontrar algún modo de convertir los datos en actividad neuronal. Igual que una foto digital de Jennifer Aniston es un modo de convertir su imagen en una serie de ceros y unos, nuestros cerebros toman los datos sensoriales que nos bombardean y deciden si Jennifer Aniston tiene importancia suficiente para ser codificada como concepto. Si la tiene, las sinapsis que en ese momento están conectadas con esa neurona se reforzarán y sobrevivirán, asegurando así que esa neurona se activará cuando el cerebro reciba la información visual asociada. Cada concepto tendrá su propia cadena sináptica de actividad neuronal. Me gustó especialmente el caso de un paciente que tenía una neurona que se activaba siempre que se le mostraba una imagen del teorema de Pitágoras: una neurona mucho más exigente.

La sorpresa se encuentra quizá en lo selectiva que era la neurona a la hora de activarse. No parecía interesada en ninguna otra imagen. Como me explicó Koch, no estaban afirmando que esa neurona era la única consagrada a codificar la idea «Aniston» o «Pitágoras». Eso sería tremendamente

ineficiente. El experimento tenía limitado el número de neuronas a las que se podía preguntar. Parece muy probable que, igual que la serie de unos que sirven para registrar una fotografía digital en mi teléfono móvil, el cerebro tiene una selección de neuronas que se activan a lo largo y ancho del mismo para codificar el concepto «Aniston». Pero Koch cree que solamente hay un número muy pequeño de ellas involucradas en el proceso de codificación, unos cientos o quizá miles, casi nada en comparación con los millones que se precisan para codificar una imagen así en un ordenador.

Esta codificación va a ser muy relevante para comprender un concepto llamado *quale* (*qualia* en plural). Un *quale* es una cualidad o propiedad tal y como es percibida o experimentada por alguien, como el color rojo. No importa si uno está viendo el dado de casino, una camiseta del equipo de fútbol del Arsenal o la cruz en la bandera de san Jorge, en todos los casos se trata de la experiencia del rojo. El reto es determinar si los *qualia* de una persona coinciden o no con los de otra. Y si los animales o los ordenadores experimentan los *qualia*.

Puedo imaginar que la naturaleza matemática de la codificación de conceptos en el cerebro podría muy bien captar diferentes *qualia*. Si pensamos en las neuronas que se activan cuando ven una camiseta del Arsenal o un tomate, los resultados de Koch sugieren que podemos imaginar esto como una palabra del código, formada por miles de millones de ceros y unos, que se ilumina a lo largo del cerebro al reconocer el concepto. Las diferentes palabras del código pueden interpretarse como puntos o como indicadores de formas, como los cristales en los espacios geométricos de dimensión superior. Las formas de esta geometría ¿codifican diferentes *qualia*? ¿Hay algo común en las formas de la codificación de una camiseta del Arsenal y del dado de casino que significa que experimentamos la sensación de rojo?

¿Podría ser éste también el origen de la sinestesia? Quizá en algunos cerebros la codificación de la *quale* del rojo tiene

una forma que es muy parecida a la que codifica el concepto «número 7», tanto que cuando el cerebro reconoce dicho concepto, activa la sensación de rojo.

Volviendo al telescopio de papel y al agujero en mi mano, Koch me explicó que se puede modificar un poco el experimento para comprobar si el ser consciente de algo implica el encendido de estas neuronas conceptuales. Supongamos que tenemos dos telescopios de papel, uno colocado en cada ojo. En el extremo de uno de los telescopios coloco una imagen de Jennifer Aniston. Está claro que las «neuronas Jennifer Aniston» se activarán. Pero ahora proyectamos una imagen del teorema de Pitágoras en el extremo del otro telescopio. De nuevo, el cerebro tiene que escoger cuál de las imágenes llegará hasta la conciencia.

Lo que tiende a ocurrir en estos experimentos es que la imagen de Jennifer Aniston desaparece de nuestra conciencia por deferencia hacia la nueva imagen que el cerebro recibe. La imagen del teorema de Pitágoras tiene preferencia, de manera que el participante ya no es consciente de la imagen de Jennifer Aniston, a pesar del hecho de que el cerebro sigue recibiendo la misma información concerniente a la actriz.

Entonces, ¿podemos ver un cambio en la actividad cerebral correspondiente al cambio en la percepción consciente? Experimentos con monos parecidos a los realizados con enfermos epilépticos indican que las neuronas que se activan al reconocer un concepto dejan de estar activas cuando se introduce una segunda imagen.

Yo sugeriría que esto nos ayuda a centrarnos en el hecho de que hay algo en la actividad electrodinámica del cerebro que contribuye a determinar aquello de lo que somos conscientes. Esto parece obvio, pero supongamos que pensamos que la conciencia es resultado de una fuerza o un ente físico todavía por descubrir, o de cualquier otra cosa. Entonces, si las neuronas siguen activadas después de que ya no seamos conscientes de la imagen de Jennifer Aniston, esto apoya-

ría la idea de que algo más estaba controlando la situación y por ello súbitamente dejamos de ser conscientes de la imagen. Esa otra cosa hubiese tenido que desconectar la experiencia consciente.

Esta capacidad de conectar y desconectar nuestra conciencia de algo está en la base de muchos de los trucos de los magos y los ilusionistas. Recuerdo vívidamente una sesión de la Real Sociedad de Londres para el Avance de la Ciencia Natural en la que Richard Wiseman, profesor de psicología de la universidad de Hertfordshire, nos mostró un vídeo a los académicos en el que los miembros de dos equipos de baloncesto se pasaban el balón entre sí. «Quiero que cuenten cuántos pases del balón realizan los jugadores del equipo negro», nos indicó Wiseman. Luego, siguiendo una estrategia típica de los ilusionistas, nos vendió una pista falsa para asegurarse de que todos concentráramos nuestra atención en la tarea propuesta: «Los hombres y las mujeres suelen contar los pases de modo diferente».

Pasó el vídeo y todos contamos. Cuando acabó, Wiseman preguntó cuántos habíamos contado 17 pases. Se levantaron unas cuantas manos. ¿18 pases? Se levantaron otras tantas. ¿Y quién vio al hombre disfrazado de gorila que entró hasta el centro de la pista e hizo retumbar su pecho con los puños antes de retirarse?». ¡Qué! Yo no había visto nada de eso. Pensaba que nos estaba tomando el pelo, hasta que vi dos manos levantadas. No se habían preocupado de concentrarse en contar los pases, y con su atención libre para divagar, habían visto al hombre disfrazado de gorila. Pero mi cerebro no había ofrecido esta información a mi experiencia consciente. Fue un importante mensaje para los científicos que estábamos sentados aquel día en la sala de la Real Sociedad de Londres: si uno se concentra demasiado en una cosa, puede dejar de ver al gorila que tiene justo delante.

Esa sensación de cosas que entran y salen flotando de la conciencia es muy familiar para mí como investigador ma-

temático. Muchas veces tengo la impresión de que el trabajo que hago en mi despacho siembra las semillas de las ideas que normalmente alcanzan su madurez después de haber dejado el despacho. Yo creo que esos chispazos de clarividencia de los que la gente tanto habla son resultado del latido subconsciente del cerebro, que trabaja por resolver un problema, y luego, cuando algo por fin casa, hace que se active en la mente consciente, con una descarga de dopamina para asegurarse de que no pase desapercibido.

El descubrimiento matemático del que más orgulloso me siento me vino de esta manera. Había estado trabajando todo el día en el Instituto Max Planck de Bonn, intentando hallar la solución de un espinoso problema sobre el que estábamos volcados un colega y yo. Nada parecía funcionar. Pero por la tarde, cuando había desconectado ya mis pensamientos conscientes del problema y trataba de hablar por teléfono con mi mujer, que estaba en Londres, «vi» súbitamente un nuevo objeto simétrico con propiedades extrañas e inesperadas. Escribí la idea que me vino repentinamente a la conciencia en mi libreta de hojas amarillas rayadas (mi lienzo favorito), y hoy me sigue pareciendo extraordinario cómo apareció aquello en mi mente, un objeto que no había sido concebido nunca, hasta ese momento en el que estaba con el teléfono en la mano en Bonn. Fue como si este nuevo concepto matemático hubiera irrumpido en mi cerebro consciente, después de haber sido pulido por mi subconsciente, acompañado de una descarga de sustancias químicas para asegurarse de no pasar desapercibido. Aun así, qué sucedió exactamente para que sintiera esa experiencia sigue siendo todo un misterio.

EXPERIENCIAS EXTRACORPORALES

El telescopio de papel de Koch revela lo fácil que es confundir nuestra visión y cambiar el modo de experimentar nuestro entorno. Pero hay trucos todavía más espectaculares para

jugar con nuestro cerebro. Mezclando varios sentidos al mismo tiempo, es posible alterar drásticamente nuestra conciencia, hasta el extremo de que podemos desplazar la conciencia de nuestro «yo» a un punto que esté completamente fuera de nuestros cuerpos.

Uno de los ejemplos más chocantes de esto es lo que se llama el efecto McGurk. Si el lector hace una búsqueda en YouTube, encontrará fácilmente un vídeo que ilustra este efecto, y después de haberlo visto, comprenderá el extraordinario poder que tiene el cerebro para crear experiencias conscientes que en realidad no están ahí.

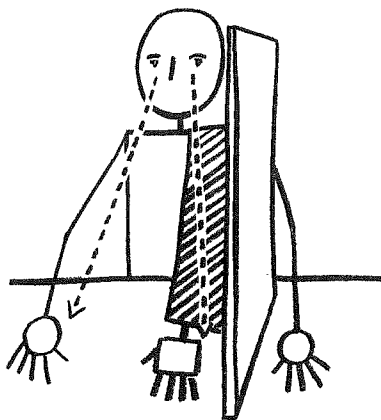
La ilusión comienza escuchando y mirando la cara de una persona que parece estar articulando los sonidos «Fa... Fa... Fa». Sin embargo, al cerrar los ojos, el sonido se transforma súbitamente en «Ba... Ba... Ba». Éste era el sonido desde el principio, pero como uno ve una boca que hace los movimientos asociados con el sonido «Fa», el cerebro se confunde con la información contradictoria. Como el cerebro siempre busca una experiencia consciente integrada, si encuentra una descripción consistente con nuestra experiencia previa, ésta es la que envía a la conciencia. Con mucha frecuencia es la visión la que prevalece sobre el sonido cuando se trata de integrar varios sentidos.

En contraste con el caso del hombre disfrazado de gorila, incluso sabiendo lo que pasa, es muy difícil obligar al cerebro a que oiga «Ba» a la vez que ve la boca diciendo «Fa». El cerebro es un buscador de patrones y trata de imponer una estructura en la cacofonía de informaciones con la que se le bombardea. Cuando la información es ambigua, como en el ejemplo del cubo de Necker o el efecto McGurk, el cerebro tiene que elegir.

Estas ilusiones son un aviso para todos los que tratamos de ahondar en los misterios del universo. No tenemos un acceso privilegiado a la realidad. Nuestra interacción con el entorno se construye a partir de la información que reciben

nuestros cerebros, y construimos una representación plausible del mundo externo. Esta mezcla de sentidos tiene algunas consecuencias muy extrañas a la hora de pretender fijar la localización de nuestra conciencia.

El sufrir en mi propia piel un experimento que se realizó en el Instituto Karolinska de Suecia hizo que pusiera en duda en qué punto tengo localizado mi «yo». Desarrollado por Henrik Ehrsson en 2007, el experimento logró con éxito que sintiera que mi conciencia estaba localizada en el cuerpo de otro. La inspiración para este trabajo surgió de un famoso experimento que se conoce como la ilusión de la mano de goma. En este experimento, se coloca la mano del participante detrás de una pantalla, fuera de su vista, y se sustituye por una mano de goma, a la vista del participante y unida por una manga al cuerpo del mismo. Al principio, el participante la ve como lo que es: una mano falsa. Pero si el experimentador empieza a acariciar ambas manos, la falsa (que está a la vista) y la verdadera (que está oculta), de manera sincronizada, se produce un extraño desplazamiento.



Los estímulos visuales y sensitivos combinados son ambiguos, de modo que el cerebro trata de encontrarle un senti-

do a lo que pasa. La visión domina de nuevo, y el participante empieza a identificarse con la mano falsa, hasta el punto de que cuando se golpea la mano falsa con un martillo, el individuo suele reaccionar como si lo estuvieran atacando. La combinación del sentido de la vista y el sentido del tacto ha engañado al cerebro y le ha hecho identificarse con la mano falsa. Lo que más sorprende es la plasticidad del cerebro, que se ha reprogramado en unos pocos minutos para identificarse con una mano falsa.

En el Instituto Karolinska, la combinación entre la información visual y la táctil se ha llevado un paso más allá. Muchos de los avances en neurociencias se deben al desarrollo de nueva tecnología; en este caso, gafas de realidad virtual. Me pidieron que me pusiera las gafas, mientras Ehrsson se calaba lo que parecía un birrete con dos cámaras incorporadas. Estas cámaras iban a ser mis ojos. Lo que grabaran lo compartirían mis gafas virtuales, y esto haría que adoptase el punto de vista de Ehrsson. Hasta aquí, nada especial. Pero cuando me pidió que le estrechara la mano, las cosas empezaron a ser surrealistas.

Al estrecharnos la mano, Ehrsson me pidió que sacudiera el brazo al mismo ritmo que él, y esta combinación de visión y tacto hizo que me identificara cada vez más con el brazo que supuestamente era el mío, ya que era el que veía que salía de mi cuerpo. Lo raro es que no era realmente el mío, sino el de Ehrsson. La identificación fue tan fuerte que cuando Ehrsson sacó un cuchillo y lo acercó a su propia mano, yo reaccioné como si fuera mi mano la que iba a cortar. Desde mi visita a Estocolmo, Ehrsson ha perfeccionado todavía más esta ilusión, haciendo creer a los participantes que su conciencia se encuentra localizada en una muñeca Barbie.

Semejantes efectos solían aparecer solamente en las películas. Algunas recientes de ciencia ficción han explorado esta idea de experiencia extracorporal, por ejemplo *Avatar* o *Los sustitutos*. Pero, después de haber participado en los

experimentos de Ehrsson, me pregunto cuánto tiempo pasará antes de que pueda enviar un avatar a un concierto o a la cumbre del Everest y, una vez que alimente a mi cuerpo en casa con toda la información sensorial que aquél haya recogido, sienta que estoy realmente sentado en la sala de conciertos o erguido en el techo del mundo.

CUERPO Y MENTE

Estos experimentos van hasta el núcleo del espinoso punto conocido como el problema cuerpo-mente. ¿Es la conciencia un ente aparte del cuerpo? Ciertamente parece creada por él, pero ¿deberíamos considerar la conciencia como algo distinto de lo que es propiamente el cuerpo, el soporte físico? ¿Qué significa para la mente estar localizada en un cuerpo? Algunos han argumentado que la mente es algo genuinamente independiente del cuerpo. Ésta era la opinión de Descartes.

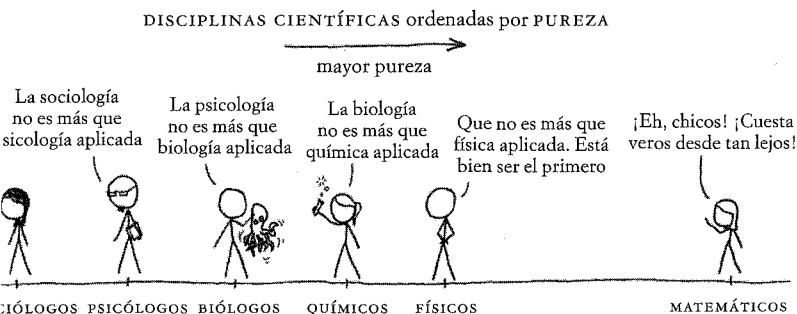
Su teoría, conocida como dualismo, postula que el mundo mental existe aparte del mundo físico. *Alma* es la palabra que algunos han usado para describir esa «otra cosa» que existe en ese mundo mental. La cuestión de hasta qué punto esa otra cosa es independiente del cuerpo en el que habita es parte del debate. Los experimentos de Ehrsson desplazan la localización aparente de esa otra cosa, sea lo que sea, planteando un desafío a nuestro sentido de la unidad espacial de cuerpo y mente. Pero la consciencia de uno mismo sigue pareciendo muy dependiente del cuerpo, porque parece que solamente manipulando la información sensorial somos capaces de jugar con la naturaleza de nuestra experiencia consciente.

Ha habido una tendencia creciente a hablar de fenómenos emergentes, un término acuñado para expresar cómo surgen algunas cosas de entidades más fundamentales y que sin embargo son también ellas mismas fundamentales e irreducti-

bles. La idea apareció brevemente en la «frontera» anterior, en la que evaluamos la propuesta de que el tiempo es emergente y no fundamental. La emergencia, cuando se aplica a la conciencia, es un intento de encontrar una solución intermedia entre el reduccionismo extremo y el dualismo escalofriante de Descartes. La humedad es el ejemplo clásico de un fenómeno emergente: una molécula de H_2O no está húmeda; para que aparezca la humedad se requiere considerar un gran número de moléculas.

Muchos neurocientíficos dicen ahora que la conciencia es algo parecido a la humedad del agua. Probablemente es cierto que la conciencia es un fenómeno emergente, en el sentido de que surge como una propiedad correspondiente a un estrato superior como consecuencia de la actividad neuronal que se desarrolla en un estrato inferior. Pero esto sigue sin explicar qué es en verdad ese estrato superior.

Algunos han argumentado que el concepto «emergencia» es sólo el camino que han encontrado los químicos y los biólogos para reivindicar que su disciplina es distinta de la física y de las matemáticas, y no un mero corolario de ellas. Un reduccionismo extremo nos diría que una reacción química o un proceso biológico no es más que una ecuación matemática que describe a la física en acción. Este espíritu reduccionista queda perfectamente recogido en una de mis historias favoritas del sitio web xkcd.com.



Estando el primero de la lista, siempre me ha hecho mucha gracia ese espacio aparte reservado, a la derecha de la viñeta, a la matemática presuntuosa. La emergencia es lo que han inventado los de la izquierda de la viñeta para estropear la foto.

A menudo me pregunto si las matemáticas ofrecerán un buen ejemplo de dualismo, algo que existe en un reino puramente mental, desconectado de la realidad física. Nuestro propio acceso a este mundo depende ciertamente de la realización física de las matemáticas. Llegamos al descubrimiento de π porque los antiguos egipcios quisieron determinar los impuestos que habría de pagar una parcela de forma circular, formada por el Nilo. Pero la naturaleza irracional de este número significa que en el mundo real solamente podemos aproximarnos a él. Aun así, es real en nuestra mente, es algo que puede ser definido con precisión y explorado lógicamente. ¿Dónde está entonces?

¿Acaso la aplicación de mi teléfono móvil que intenta convencerme de que es consciente no es un programa matemático que tendría sentido aunque no hubiera un teléfono para convertirla en una realidad? Cuando le pregunto a Cleverbot si no es ni más ni menos que un programa matemático, replica con una interesante respuesta: «Podría ser. ¿Y tú?».

Lo que somos hoy procede de nuestros pensamientos de ayer y nuestros pensamientos presentes forjan nuestra vida de mañana; nuestra vida es la creación de nuestra mente.

Dhammapada

Hace unos años mi mujer estuvo en coma como consecuencia de un accidente. Pasé muchas horas en el hospital preguntándome si ella todavía seguía allí o si por el contrario estaba al lado de un cuerpo que ya no tenía conciencia. Afortunadamente se despertó a las dos semanas, pero ¿qué pasa con los que no pueden responder físicamente? Para algunos, el cuerpo se ha convertido en una colección de células sin experiencia consciente: el estado vegetativo. Pero para otros está el terrible escenario de una conciencia encerrada en un cuerpo que no responde. En esas situaciones, ¿hay alguna manera de preguntarle al cerebro si es consciente o no? Por increíble que parezca, sí que la hay, y tiene que ver con jugar al tenis, o al menos con imaginar que se juega al tenis.

Invoquemos nuestra propia imagen jugando al tenis. Fuertes golpes de derecha. *Smashes* de revés. Cuando se nos pide que nos imaginemos a nosotros mismos jugando al tenis, hemos de adoptar una decisión consciente para participar; no se trata de algún tipo de respuesta automática a un estímulo físico. Pero una vez que uno ha empezado a imaginar esas acciones, un escáner fMRI puede registrar la actividad neuronal correspondiente a la actividad motora asociada con los golpes de la pelota que uno se está imaginando que hace en el juego.

El descubrimiento de que se podría usar el fMRI para ver

a los pacientes tomar decisiones conscientes se debe al neurólogo británico Adrian Owen y su equipo, cuando a principios de 2006 estaban investigando a una joven de veintitrés años a la que se le había diagnosticado una situación de estado vegetativo. Cuando a la paciente se le pidió que se imaginara que estaba jugando al tenis, Owen vio, con gran sorpresa, que se iluminaba en el escáner la región correspondiente al área motora suplementaria. Cuando le pidieron que se imaginara que circulaba por su casa, se activó otra región, el llamado giro parahipocampal, la que se precisa para la coordinación espacial. Fue un descubrimiento sumamente fascinante, y mucho más teniendo en cuenta que los doctores rediagnosticaron a la muchacha como consciente pero bloqueada.

Lo mismo sucedió con muchos otros pacientes que habían sido previamente considerados en estado vegetativo. Esto hace posible que los doctores, y lo que es más importante, también los familiares, hablen con estas personas que están conscientes pero bloqueadas dentro de sus cuerpos y les hagan preguntas. Ante una pregunta, un paciente puede señalar la respuesta «sí» sólo con imaginarse a sí mismo jugando al tenis, lo que crea una actividad que, como hemos visto, puede registrarla un escáner. Quizá no nos diga qué es la conciencia, pero la combinación de tenis y fMRI nos ha dado un extraordinario medidor de conciencia.

El mismo protocolo basado en el juego de tenis se utiliza para examinar otro caso en el que nos vemos desprovistos de conciencia: la anestesia. Recientemente me presenté como voluntario—el voluntario número 26—para un proyecto de investigación diseñado en Cambridge con el fin de explorar el momento en el que una persona anestesiada pierde la conciencia. Ha habido algunos casos terribles de pacientes que no podían moverse pero que estaban plenamente conscientes durante una operación.

En el experimento me introdujeron en un escáner fMRI después de haberme inyectado unas buenas dosis de propo-

fol, la droga que Michael Jackson había estado consumiendo antes de morir. Después de unas cuantas tomas de anestesia, he de reconocer que no me extraña nada que Jackson se volviera adicto a esta droga, dados los efectos maravillosamente sedantes que produce. Pero yo estaba allí para trabajar. Con cada nueva dosis, me pedían que me imaginara que estaba jugando al tenis. Al ir aumentando progresivamente la dosis, el equipo pudo determinar el momento crítico en el que perdí la conciencia y dejé de jugar al tenis imaginario. Para mí, resultó interesante ver después cuánto propofol fue necesario para pasar de tener paralizado mi cuerpo a tener apagada mi conciencia.

Cuando el resto del cuerpo es incapaz de moverse o comunicarse, la posibilidad de preguntar al cerebro ha permitido a los investigadores calibrar exactamente cuánta anestesia es precisa para desconectar temporalmente la conciencia de una persona y poder así operarla.

Este medidor de conciencia basado en el juego de tenis nos lleva también a la estrecha relación existente entre la conciencia y el libre albedrío: hay que elegir imaginarse a uno mismo jugando al tenis. Y sin embargo, algunos experimentos recientes en los que se ha observado al cerebro en acción han desafiado radicalmente nuestra idea del libre albedrío del que se supone que gozamos.

¿ESTOY AL MANDO?

Estoy seguro de que el lector hizo valer su libre albedrío cuando decidió leer este libro. Que fue una elección consciente tomar hoy el libro y venir a dar a esta página. Pero el libre albedrío, al parecer, puede ser sólo una ilusión.

Muchas de las investigaciones punteras en neurociencia se están haciendo actualmente. A diferencia de los casos del descubrimiento del quark o de la expansión del universo, es posible ser testigo de gran parte de estas investigaciones en

el momento en el que se llevan a cabo e incluso participar en ellas. Un experimento diseñado por el científico de origen inglés John-Dylan Haynes es probablemente el más chocante entre los que tienen implicaciones en nuestra idea preconcebida sobre el control de las decisiones.

Espero que el lector no se haya cansado de los escáneres fMRI, porque en mi deseo por saber cómo el cerebro crea la experiencia consciente acabé metido en uno, esta vez en Berlín. Ya tumbado dentro de él, me dieron una pequeña consola portátil con dos botones: el uno para ser activado con la mano derecha y el otro con la izquierda. Haynes me pidió que me relajara al estilo zen y que, cuando quisiera, pulsara uno de los botones.

Durante el experimento, tenía que llevar puestas unas gafas virtuales, en cuya pequeña pantalla aparecían una serie de letras al azar. Me pidieron que retuviera la letra que aparecía cada vez que decidía apretar uno de los botones.

El escáner fMRI registraba mi actividad cerebral mientras tomaba mis decisiones conscientes al azar. Lo que Haynes ha descubierto es que, analizando mi actividad cerebral, es capaz de predecir qué botón voy a apretar seis segundos antes de que yo mismo sea consciente de cuál de ellos elegiré. Seis segundos es mucho tiempo. Mi cerebro decide qué botón—el derecho o el izquierdo—le ordenará a mi cuerpo que pulse. Entonces empezamos a contar: un elefante, dos elefantes, tres elefantes, cuatro elefantes, cinco elefantes, seis elefantes. Solamente ahora se envía la decisión a mi cerebro consciente, y tengo la sensación de que estoy actuando siguiendo mi libre albedrío.

Haynes puede saber qué botón voy a apretar porque hay una región en el cerebro que se enciende seis segundos antes de que lo pulse, preparando la actividad motora. Se enciende una región diferente del cerebro según el cerebro esté preparando el dedo derecho o el dedo izquierdo para ejercer presión sobre el botón. Las previsiones de Haynes no aciertan

en su totalidad, pero son claramente más precisas que si uno intentara averiguar la intención al azar. Además, cree que con una tecnología más fina será posible acercarse a un porcentaje de acierto del 100 %.

Hay que señalar, no obstante, que éste es un proceso de toma de decisiones muy especial. Si, por ejemplo, estamos sufriendo un accidente, el cerebro toma decisiones en décimas de segundo, y el cuerpo reacciona sin necesidad de que tenga lugar actividad cerebral consciente alguna. Muchos procesos cerebrales transcurren automáticamente y sin involucrar nuestra conciencia, evitando así que el cerebro se sobrecargue con tareas rutinarias. Pero decidir pulsar el botón de la derecha o de la izquierda no es una cuestión de vida o muerte. Presionar o no el botón de la izquierda es una decisión libre.

En la práctica, el equipo de investigación de Berlín tarda varias semanas en analizar los datos del fMRI, pero la tecnología de los ordenadores y la técnica de imágenes avanzan, y la posibilidad de que esta conciencia de Haynes sepa qué botón voy a pulsar seis segundos antes de que mi conciencia asuma una decisión que yo creo que estoy tomando por libre elección está ahí.

Aunque aparentemente el cerebro no es consciente de preparar la decisión con mucho tiempo de antelación, aún no está claro dónde se toma la decisión final. Quizá todavía podría volverme atrás y revocar la decisión que el cerebro ha adoptado para que la ejecute. Si no soy «libre para querer» algo, los hay que han sugerido que quizá sí sea «libre para no quererlo»: que pueda oponerme a la decisión de apretar el botón izquierdo una vez que llega al cerebro consciente. En este experimento, da lo mismo pulsar un botón u otro, con lo cual no tiene mucho sentido oponerse a la decisión que el cerebro inconsciente ha adoptado para que la ejecute.

El experimento parece sugerir que la conciencia puede ser una función muy secundaria del cerebro. Ya sabemos que mucho de lo que decide nuestro cuerpo ocurre de ma-

nera totalmente inconsciente, pero lo que creemos que nos distingue como seres humanos es que nuestra conciencia actúa en las decisiones que tomamos. Pero ¿no podría ser que la conciencia entre en escena y nos involucre solamente después de la cadena de sucesos? Nuestra sensación consciente de la toma de una decisión ¿es simplemente una reflexión química tardía sin influencia alguna en nuestros actos? ¿Qué implicaciones legales y morales podría tener esto? «Lo siento, señoría, pero no fui yo el que disparó a la víctima. Mi cerebro ya había decidido seis segundos antes que apretaría el gatillo». Pero cuidado: ¡el determinismo biológico no supone una defensa ante la ley!

Como ya he dicho, el ejercicio de pulsar botones que me propuso Haynes es irrelevante, y esto puede sesgar el resultado del experimento. Si se tratara de algo que me implicase más directamente, a lo mejor no le permitiría a mi subconsciente que tuviera tanto protagonismo. Haynes ha repetido el experimento con una actividad algo más atractiva intelectualmente. A los participantes se les pide sumar o restar un número a los números que aparecen en la pantalla. De nuevo, la decisión de sumar o restar la señala la actividad cerebral que se detecta cuatro segundos antes de la decisión consciente de actuar.

Pero ¿qué pasaría si tomáramos el ejemplo propuesto por el filósofo Jean-Paul Sartre de un joven que tiene que optar entre unirse a la Resistencia o cuidar de su abuela? Quizá en este caso la deliberación consciente desempeñe un papel más importante en el resultado y recupere el libre albedrío de manos del fMRI. Quizá las acciones realizadas en los experimentos de Haynes se parecen demasiado a respuestas subconscientes automáticas. Ciertamente, muchos de mis actos afloran a mi conciencia solamente en un momento posterior, porque no hay necesidad de que mi conciencia sepa mucho sobre ellos. El libre albedrío es reemplazado por la libertad de la indiferencia.

La actividad cerebral preconsciente puede muy bien ser

únicamente un factor añadido en la decisión que se toma en el momento de la deliberación consciente. No representa necesariamente la única causa, pero ayuda a confirmar la decisión: ésta es una opción que el lector puede tener a bien considerar.

Si gozamos de libre albedrío, uno de los retos es comprender de dónde procede. Yo no creo que mi teléfono tenga libre albedrío. Es simplemente un conjunto de algoritmos que solamente puede seguir de modo determinista. Sólo para probar, le pregunté a la aplicación de mi teléfono móvil, ese robot parlante, si pensaba que estaba actuando libremente a la hora de tomar decisiones. Me respondió de modo bastante críptico: «Elegiré un camino que sea claro, elegiré el libre albedrío».

Ya sé que esta respuesta está programada en la aplicación. Puede ser que tenga un generador de números aleatorios que asegure que sus respuestas son variadas e impredecibles, para dar la apariencia de libre voluntad: un dado de casino virtual que selecciona las réplicas entre las ofrecidas por una base de datos. Pero el azar no es libertad: esos números aleatorios están generados por un algoritmo cuyos resultados son necesariamente de carácter aleatorio. Como descubrimos en la tercera «frontera», quizá mi teléfono móvil deberá recurrir a ideas de la física cuántica si quiere tener alguna oportunidad de afirmar su libre albedrío.

La creencia en el libre albedrío es una de las cosas a las que me aferro, porque creo que me distingue de la aplicación del robot parlante de mi teléfono; por eso el experimento de Haynes me produjo tanto desasosiego. Quizá mi mente también es solamente la expresión de una aplicación sofisticada a merced del algoritmo biológico del cerebro.

El matemático Alan Turing fue uno de los primeros en preguntarse si máquinas como mi teléfono móvil podrán alguna vez pensar de manera inteligente. Consideró que una buena prueba de inteligencia sería preguntarse, al comunicarse con una persona y con un ordenador, si era posible distinguir

la persona del ordenador. Ésta era la prueba, llamada prueba o test de Turing, a la que estaba sometiendo a Cleverbot al principio de esta «frontera». Como solamente puedo evaluar la inteligencia de mis compañeros humanos hablando con ellos, si un ordenador puede hacerse pasar ante mí como humano, ¿por qué no considerarlo inteligente?

Pero ¿no hay diferencia entre una máquina que sigue instrucciones y la dedicación consciente de mi cerebro a una actividad? Si tecleo una frase en inglés en mi teléfono móvil, las aplicaciones que tiene cargadas son fantásticas a la hora de traducir esa frase a la lengua que yo elija. Pero nadie piensa que el teléfono esté entendiendo lo que hace. La diferencia puede quizá ilustrarse con un experimento mental llamado la «habitación china», ideado por el filósofo John Searle, de la universidad de California. El experimento muestra que la capacidad de seguir instrucciones no prueba que una máquina tenga una mente propia.

Yo no hablo mandarín, pero imaginemos que me encierran en una habitación con un manual de instrucciones que me proporciona una respuesta adecuada a cualquier sucesión de caracteres chinos que me envíen. Podría mantener una animada conversación con un hablante de mandarín sin entender ni una sola palabra de mis intervenciones. De modo similar, mi teléfono parece que habla muchos idiomas, pero no diríamos que entiende lo que traduce.

Éste es un desafío muy poderoso para cualquiera que piense que el mero hecho de que una máquina responda como un ente consciente ha de ser considerado medida suficiente de que posee una conciencia. Vale, podría hacer cualquier cosa de las que realiza una persona consciente, pero... ¿es *realmente* consciente? Entonces, de nuevo, ¿qué hace mi mente mientras escribo estas palabras? ¿Estoy siguiendo simplemente una serie de instrucciones? ¿Podría haber un umbral a partir del cual tendríamos que aceptar que el ordenador entiende el mandarín, y por lo tanto también otro a partir del

cual el algoritmo en cuestión habría de ser considerado un ente consciente? No obstante, antes de que podamos programar un ordenador para que sea consciente, necesitamos comprender por qué es tan especial el algoritmo que se desarrolla dentro de una mente humana.

SUBE LA MAREA

Uno de los métodos mejores para sondear la correlación entre conciencia y actividad cerebral es comparar cerebros conscientes con cerebros inconscientes. ¿Hay alguna diferencia visible en la actividad cerebral? No es preciso esperar a que un paciente entre en coma o inyectarle anestesia para hacer esta comparación, porque hay otra situación en la que cada día, o mejor dicho, cada noche, perdemos la conciencia: el sueño. Y es la ciencia del sueño y lo que ocurre en el cerebro en estos períodos inconscientes la que ofrece las mejores ideas sobre lo que el cerebro hace para crear nuestra experiencia consciente.

Así que visité el Centro del Sueño y la Conciencia de la universidad de Wisconsin-Madison, en el que experimentos dirigidos por el neurólogo Giulio Tononi y su equipo han revelado un comportamiento del cerebro espectacularmente diferente según éste se encuentre despierto o dormido sin experimentar sueños.

En el pasado era imposible preguntar cosas al cerebro cuando estaba dormido. Pero la estimulación magnética transcranial, o TMS en sus siglas en inglés, permite a los científicos acceder al cerebro y activar artificialmente a las neuronas. Aplicando un campo magnético que fluye rápidamente, el equipo puede activar regiones específicas del cerebro cuando estamos despiertos y, más interesante todavía, también cuando estamos dormidos. La cuestión es si esta estimulación artificial de las neuronas hace que el cerebro consciente despierto responda de manera diferente al cerebro inconsciente dormido.

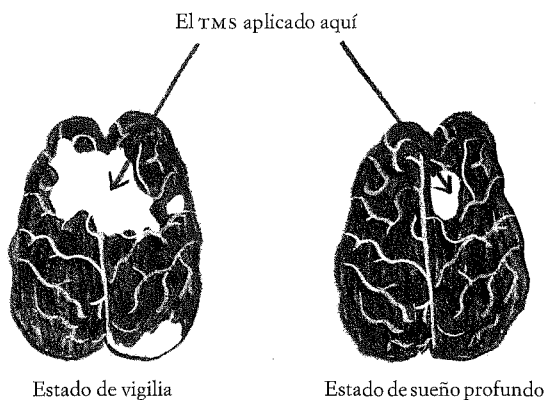
Estaba un poco nervioso pensando que me iban a irradiar el cerebro. Al fin y al cabo, es mi herramienta principal a la hora de investigar en matemáticas. Si me lo descomponen, voy a tener problemas. Pero Tononi me garantizó que era un experimento muy seguro. Usando su propio cerebro, uno de sus colegas mostró cómo se podía activar una región conectada con la actividad motora de la mano. Fue muy sorprendente ver cómo el irradiar esta región causaba el movimiento del dedo. Cada descarga del TMS era como accionar un interruptor en el cerebro que daba al dedo la orden de moverse. Como el colega de Tononi no pareció afectado por la irradiación, acepté participar en el experimento.

El primer paso consistía en aplicar el TMS a una pequeña zona del cerebro mientras estaba despierto. Los electrodos fijados a mi cabeza recogieron el efecto con ayuda de la EEG. Los efectos revelaron que diferentes áreas alejadas del lugar estimulado respondieron en momentos diferentes siguiendo un patrón complejo que realimentaba el lugar original de estimulación. El cerebro, explica Tononi, interactúa como una red integrada compleja. Las neuronas actúan como una serie de puertas lógicas interrelacionadas. Una neurona puede activarse si la mayoría de las otras a las que está conectada también lo hacen. O puede activarse si solamente una de las neuronas conectadas con ella lo está. Lo que se veía en la EEG era el flujo lógico de actividad producida por el encendido de las neuronas iniciales con el TMS.

Para la segunda fase del experimento era preciso que me quedara dormido. Una vez que estuviera en la fase profunda del sueño, en la fase 4, aplicarían el TMS a mi cerebro exactamente en el mismo punto, estimulando la misma zona. Esencialmente, el TMS activa las mismas neuronas, encendiéndolas como lo haría un interruptor; y la cuestión es: ¿cómo ha cambiado la estructura de la red al pasar el cerebro del estado consciente al estado inconsciente? Desgraciadamente, esta parte del experimento me resultó demasiado difícil. Tengo

un sueño increíblemente ligero. Permanecer con la cabeza cubierta de electrodos y saber que alguien iba a venir a irradiarme el cerebro en cuanto me quedara dormido no era la situación más propicia para alentarme al sueño profundo. A pesar de no haber tomado café en todo el día, no pude pasar de un ligero sueño intermitente del «estado 1».

Me tuve que conformar con los datos de un paciente que sí había sido capaz de quedarse dormido en esas condiciones tan poco favorables. Los resultados eran espectaculares. La actividad eléctrica no se propaga por el cerebro, como cuando estamos despiertos. Es como si la red estuviera desconectada. Ha subido la marea y ha cortado todas las conexiones, y cualquier actividad está muy localizada. La implicación fascinante de todo esto es que la conciencia tiene que ver quizá con la integración compleja en el cerebro, y que es resultado de las puertas lógicas interrelacionadas que controlan cuándo el encendido de un conjunto de neuronas produce el encendido de otras. En particular, los resultados sugieren que la conciencia está relacionada con el proceso seguido para alimentar y realimentar la información entre las neuronas originalmente activadas por el TMS y el resto de neuronas del cerebro.



Como no pude dormir en su laboratorio, Tononi me llevó a su despacho, donde me prometió que iba a compensarme por el sacrificio de haberme visto privado de cafeína preparándome un espresso perfecto con su preciada cafetera italiana. Pero quería también enseñarme una cosa. Al sentarnos envueltos por el maravilloso aroma de los granos de café molidos, me pasó un artículo con una fórmula.

Esto picó inmediatamente mi curiosidad. Las fórmulas matemáticas son para mí lo que la campana para el perro de Pávlov. Si me ponen una fórmula matemática delante, me engancho inmediatamente y quiero descifrar su mensaje. Pero no la reconocí. «Es mi coeficiente de conciencia», dijo. La conciencia en una fórmula matemática... ¿Cómo iba a resistirme?

CONVIRTIÉNDOME EN MATEMÁTICAS

Tononi me explicó que, como resultado de su trabajo sobre el tipo de comportamiento basado en una red, que es el correspondiente a los cerebros conscientes, había desarrollado una nueva teoría de redes que él piensa que son conscientes. Se llama teoría de la información integrada, o IIT en sus siglas en inglés, e incluye una fórmula matemática que mide el grado de integración y de irreducibilidad presente en una red, datos que él cree claves para crear un sentido de sí mismo. Llamada Φ (esto es, phi, la letra vigésimo primera del alfabeto griego), es una medida que puede aplicarse a máquinas como mi teléfono móvil y también al cerebro humano, y ofrece la perspectiva de un tratamiento matemático cuantitativo de lo que me hace ser «yo». Según Tononi, cuanto mayor es el valor de Φ , más consciente es la red. Creo que es el matemático que llevo dentro el que está tan excitado por la posibilidad de que haya una ecuación matemática que explique por qué y cómo yo soy «yo».

Un cerebro consciente parece semejante a una red que tie-

ne un alto grado de conectividad y de retroalimentación. Si activamos algunas neuronas en una zona de la red, el resultado es una cascada de comprobaciones cruzadas y de información que alimenta toda la red. Si la red consiste solamente en islas dispersas, parece que es inconsciente. Por tanto, el coeficiente de conciencia de Tononi es una medida de hasta qué punto la red resulta algo más que la suma de sus partes.

Sin embargo, Tononi piensa que lo importante es la naturaleza de esa conectividad del conjunto. No es suficiente con que haya una gran conectividad a lo largo de la red. Si las neuronas empiezan a activarse de modo sincronizado, esto no parece dar lugar a una experiencia consciente. De hecho, ésta es una de las cualidades del cerebro durante el sueño profundo. En el extremo opuesto, los ataques que llevan a una persona a perder la conciencia suelen asociarse con el encendido muy bien sincronizado de gran número de neuronas a lo largo del cerebro. Por lo tanto, parece importante que haya un amplio abanico de estados diferenciados. No deberían existir demasiados patrones o simetrías en el cableado, porque eso podría conducir a la incapacidad de diferenciar distintas experiencias. Si conectamos una red demasiado, se comportará del mismo modo hagamos lo que hagamos.

El coeficiente intenta captar uno de los rasgos extraordinarios de nuestra experiencia consciente: la habilidad del cerebro para integrar la gran variedad de datos informativos que el cuerpo recibe y sintetizarlos para formar una sola experiencia. La conciencia no puede descomponerse en experiencias independientes sentidas separadamente. Cuando miro el dado de casino no tengo experiencias separadas, una de un cubo sin colores y otra de una serie de manchas rojas informes. El coeficiente también trata de cuantificar cuánta información adicional se genera en la red gracias al sistema completo, en comparación con la que se generaría si estuviera disgregado en piezas inconexas, como ocurre en el cerebro durante el sueño profundo.

Tononi y sus colegas han puesto en marcha interesantes simulaciones de ordenador en «cerebros» compuestos de ocho neuronas, conectadas de diferentes formas, para ver qué redes tienen valor de Φ mayor. Los resultados indican que es deseable que cada neurona posea un patrón de conexión con el resto de la red diferenciado. Pero, al mismo tiempo, es deseable que se pueda compartir a lo largo de la red la mayor cantidad de información posible. En el caso de considerar la división de la red en dos mitades separadas, queremos que ambas puedan comunicarse entre sí. Es la búsqueda de un equilibrio interesante entre, por un lado, estar muy interconectados y evitar diferencias, y por otro, crear diferencias al precio de que la información tenga que seguir circulando.

Pero la naturaleza de la conectividad también es importante. Tononi ha creado dos redes que son funcionalmente equivalentes y que dan los mismos resultados, pero en un caso el valor de Φ es alto, porque la red se realimenta constantemente, mientras que en el otro caso el valor de Φ es bajo, porque la red está constituida de tal modo que la información solamente fluye en un sentido (las neuronas no pueden realimentarse). Tononi cree que éste es un ejemplo de una «red zombi»: una que produce la misma información que la primera red, pero que no tiene sentido de sí misma. Solamente mirando los resultados, es imposible distinguir entre sí a las dos redes. Sin embargo, la manera en la que la red zombi genera sus resultados tiene una cualidad completamente distinta, que queda medida por Φ . Según la Φ de Tononi, la red zombi no posee mundo interior.

Es estimulante saber que el sistema talamocortical del cerebro, que, como es bien conocido, desempeña un papel muy importante en la generación de la conciencia, tiene una estructura similar a las redes con un alto valor de Φ . Contrastemos este hecho con la red de neuronas del cerebelo, que no crea conciencia. Llamado también «cerebro pequeño»,

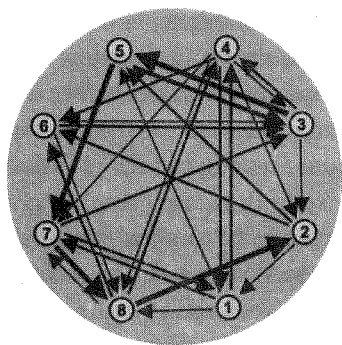
el cerebelo se encuentra localizado en la parte posterior del cráneo, y controla cosas como el equilibrio y la coordinación motora fina. Contiene el 80 % de las neuronas del cerebro y, sin embargo, si fuera extirpado, aunque nuestros movimientos se verían gravemente afectados, no se alteraría nuestro sentido de la conciencia.

En 2014, una joven china de veinticuatro años acudió al hospital con mareos y náuseas. Cuando se le escaneó el cerebro para tratar de identificar la causa, se descubrió que había nacido sin cerebelo. Aunque había tardado algo más tiempo de lo normal en aprender a andar cuando era bebé, y nunca había sido capaz de correr o saltar, ninguno de los miembros del equipo médico que la trató tuvo dudas sobre si era plenamente consciente o no. Esta joven no era una zombi, sino una mujer normal, aunque físicamente algo inestable.

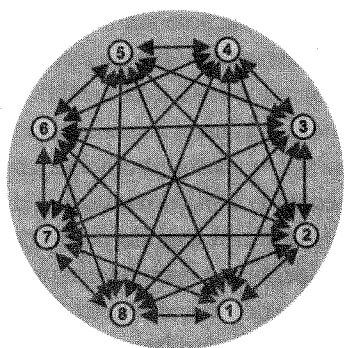
Si examinamos la red neuronal del interior del cerebelo, encontraremos parcelas que tienden a activarse independientemente unas de otras, con poca interacción, justo como en el caso de un cerebro dormido. El bajo valor de Φ de la red del cerebelo está en consonancia con la idea de que no crea experiencia consciente.

Que la conectividad del cerebro podría ser la clave de la conciencia ha conducido a la idea de que mi «conectoma» es parte del secreto que hace que yo sea «yo». El conectoma es un mapa completo de las conexiones neuronales del cerebro. Igual que el proyecto del genoma humano proporcionó información inédita sobre el funcionamiento del cuerpo, la determinación del conectoma humano puede proporcionar la oportunidad de comprender mejor el funcionamiento del cerebro. Combinando el cableado con las reglas que rigen el funcionamiento de esta red, puede que tengamos todos los ingredientes necesarios para crear conciencia en una red.

Comprender el conectoma del cerebro humano es un objetivo a largo plazo, pero ya poseemos una descripción completa del cableado de las neuronas del *C. elegans*, un gusano



Una red con un alto valor de Φ y quizá un nivel más elevado de conciencia.



Aunque muy interconectada, la simetría de esta red produce poca diferenciación a lo largo de la misma, y de esto resulta que el conjunto no contribuye a crear nueva información aparte de la inherente en las partes. Esto conduce a un valor de Φ bajo y, por lo tanto, a un nivel bajo de conciencia.

carente de cerebro, de un milímetro de longitud y con afinación probada por los montones de compost. Su sistema nervioso contiene exactamente 302 neuronas, y por ello es ideal para que podamos determinar un diagrama con el cableado completo que las une. A pesar de este diagrama, estamos todavía muy lejos de poder relacionar estas conexiones con el comportamiento del *C. elegans*.

¿ES INTERNET CONSCIENTE?

Dado que la Φ de Tononi mide cómo está interconectada una red, podría ayudarnos a entender si mi teléfono móvil, internet o incluso una ciudad, podrían conseguir tener conciencia de sí mismos. Quizá internet o un ordenador, una vez que traspasara cierto umbral en algún momento del futuro, podrían reconocerse al mirarse al espejo. La conciencia podría corresponder a un cambio de fase en este coeficiente, igual

que el agua cambia de estado cuando su temperatura traspasa el umbral necesario para que hierva o se congele.

Resulta interesante el hecho de que la administración de anestesia al cuerpo no duerme gradualmente la conciencia, sino que parece desconectarla súbitamente. Quien haya sido operado alguna vez y haya escuchado al anestesista decirle que cuente hasta veinte sabrá (o quizá no) que hay un punto en el que uno cae dormido de golpe. El cambio parece ser muy poco lineal, como una transición de fase.

Si la conciencia tiene que ver con la conectividad de la red, ¿qué otras redes podrían ser conscientes? El número total de transistores conectados a través de internet es del orden de 10^{18} , mientras que el cerebro posee unas 10^{11} neuronas. La diferencia radica en la forma en la que están interconectadas. Una neurona típica está conectada a decenas de miles de neuronas, lo que le permite un alto grado de integración de la información. Por el contrario, los transistores de un ordenador no están muy interconectados. Según la medida de Tononi, es poco probable que internet sea consciente... de momento.

Cuando hago una fotografía con la cámara digital que lleva incorporada mi teléfono, la memoria del mismo puede almacenar una variedad inmensa de imágenes diferentes. Un millón de píxeles, por ejemplo, nos dará $2^{1.000.000}$ imágenes en blanco y negro diferentes. Se recogerán detalles en los que no me he fijado al mirar el visor. Pero ésa es la cuestión: mi experiencia consciente no podría ocuparse de ese caudal inmenso de datos, y por eso se integran los datos sensoriales básicos para espigar la información significativa de la escena y delimitar su contenido.

Actualmente, los ordenadores son muy torpes a la hora de competir con la visión humana. Son incapaces de interpretar la historia que cuenta una fotografía. El problema es que el ordenador tiende a leer una imagen píxel a píxel, y le resulta muy difícil integrar la información. Por el contrario, los

humanos somos excelentes a la hora de tomar esta cantidad enorme de información visual y crear una historia a partir de los datos. Esta habilidad de la mente humana para integrar y seleccionar lo que es significativo es central en la medida de conciencia Φ de Tononi.

Por supuesto, no hay ninguna explicación que describa cómo o por qué un alto valor de Φ produciría la experiencia consciente de la que gozamos. Podemos ciertamente afirmar que tiene una correlación con la conciencia, lo cual es muy atractivo, como cuando vemos los experimentos en pacientes dormidos, cuyas redes tienen un valor pequeño de Φ . También es atractiva la consideración de las diversas parcelas del cerebro que poseen cableados distintivos. Pero todavía no podemos decir por qué esto produce conciencia, o si un ordenador con un cableado análogo experimentaría realmente la sensación de autoconciencia.

Hay buenas razones para creer que tener un valor de Φ elevado podría conllevar ventajas evolutivas significativas. Parece que permite planear el futuro. Tomando datos de diferentes sensores, la naturaleza intensamente integrada de una red con un alto valor de Φ puede hacer recomendaciones para acciones futuras. Esta habilidad para proyectarse hacia el futuro, para viajar mentalmente en el tiempo, parece ser una de las ventajas evolutivas claves de la conciencia. Una red con un alto valor de Φ parece ser capaz de exhibir ese tipo de comportamiento. Pero ¿por qué no puede hacer todo esto cuando es inconsciente?

LA CONCIENCIA POR SKYPE

Christof Koch, el científico de la «neurona Jennifer Aniston», es un partidario entusiasta de Φ como medida de la conciencia, así que estaba ansioso por indagar si pensaba que este coeficiente posee la suficiente solidez como para proporcionar una respuesta al «problema difícil», como el filósofo

David Chalmers bautizó al reto de meterse en la cabeza de otra persona.

Después de entrevistarme por primera vez con él en lo alto del monte Baldy, cerca de Caltech, Koch había aceptado la dirección de una extraordinaria aventura llamada Instituto Allen de Ciencias del Cerebro, financiado por una sola persona, Paul G. Allen, cofundador de Microsoft, con un presupuesto del orden de 500 millones de dólares. ¿La motivación de Allen? Sencillamente desea saber cómo funciona el cerebro. Es ciencia abierta a todos, sin ánimo de lucro, y publican gratis todos los datos obtenidos. Como dice Koch: «Es un modelo genial».

Como iba a ser complicado hacer otro viaje a California para interrogar a Koch sobre sus opiniones sobre Φ y la teoría de Tononi de la información integrada, decidí que lo mejor sería acceder a la conciencia de Koch a través de una llamada de Skype. Koch tenía un vivo interés, no obstante, en verificar de qué lado de la controversia filosófica sobre la conciencia me encontraba:

—De acuerdo, podemos hablar sobre la conciencia y sobre hasta qué punto el problema es irresoluble. Pero espero que no irás a desanimar a los jóvenes que se están planteando dedicarse a investigar en neurociencias dando crédito al concepto filosófico del «problema Difícil» (difícil con D mayúscula). Los filósofos como Dave Chalmers manejan sistemas de creencias y opiniones personales, y no leyes y hechos naturales. Es verdad que se hacen preguntas interesantes y que se plantean dilemas desafiantes, pero tienen un historial de predicciones muy poco impresionante.

Koch estaba impaciente por recordarme el caso del filósofo Comte y su predicción de que nunca podríamos saber qué hay en el interior de una estrella. Es una historia que he tenido en mente desde que decidí embarcarme en este viaje hacia lo desconocido. Koch añadió otra voz importante al debate, la de su colaborador Francis Crick, que escribió en

1996: «Resulta muy temerario afirmar que hay cosas que están fuera del alcance de la ciencia».

Koch estaba muy animado cuando finalmente conectamos nuestras conciencias a través de Skype—en realidad, siempre le he visto muy entusiasmado con su vida a la vanguardia del mayor desafío científico de nuestros tiempos—. Justo dos días antes, el instituto Allen había hecho públicos los datos que trataban de clasificar los diferentes tipos de células que se encuentran en el cerebro.

—Una de las incógnitas es cuántos tipos diferentes de células cerebrales hay. Desde hace doscientos años sabemos que el cuerpo está integrado por células, pero hay células cardíacas, células epidérmicas y células cerebrales. Y luego nos damos cuenta de que no existe solamente un tipo o dos de células cerebrales. Puede haber mil. O del orden de varios miles. En la corteza propiamente dicha, no sabemos cuántos hay.

Las últimas investigaciones de Koch han dado lugar a una base de datos que detalla el variado abanico de neuronas corticales presentes en el cerebro de un ratón. «Es realmente un material fascinante. Pero no es sólo un dibujo bonito como los que suelen encontrarse en las publicaciones científicas. Son todos los datos en bruto y te los puedes descargar», dice Koch. Ramón y Cajal puesto al día, en el siglo XXI.

Es este tipo de análisis científico detallado de la manera de funcionar del cerebro el que, según Koch, podría ir socavando el reto de entender cómo el cerebro produce la experiencia consciente.

Dado que Koch está sumamente interesado en conseguir jóvenes científicos que se suban al carro de la investigación de la conciencia, me preguntaba qué le habría empujado a él a embarcarse en este proyecto de investigación cuando todavía no existía ni carro siquiera. En aquel momento, muchos consideraban que ponerse a rastrear la conciencia era lo más parecido a adentrarse en el desierto del Sáhara en busca de agua.

Parte de la motivación provino de los que decían que era una zona prohibida. «Una de las razones fue demostrarles que estaban equivocados. Me gusta provocar», comenta. A Koch también le gusta asumir riesgos. Es lo que le lleva a colgarse de las paredes de una montaña, y escalar hasta la cima sin ninguna ayuda. Pero había otra faceta en su elección del tema de investigación un poco más inesperada. Resultó que, en parte, la formación religiosa que recibió era responsable de su deseo por entender la conciencia.

—Creo que lo que quería en última instancia era justificar mi creencia ininterrumpida en Dios. Quería mostrar a mi entera satisfacción que para explicar la conciencia es preciso algo más. Necesitamos algo como mi propia idea de Dios. La cosa resultó ser diferente. Cuando me di cuenta de que no había necesidad alguna de un alma, se desató una auténtica tormenta dentro de mí. No había auténtica necesidad de un alma para generar conciencia. Podría hacerse todo mediante un mecanismo, a partir del momento en que dispusiéramos de algo especial como la teoría de la integración de la información de Tononi, u otra cosa parecida.

Como vía para reafirmar su creencia en algo trascendente, Koch reconoce que falló.

—En los últimos diez años he perdido la fe; siempre he intentado recuperarla, pero no he podido. Sigo teniendo una sensación muy fuerte de que vivo en un universo misterioso. Es propicio para la vida. Es propicio para la conciencia. Todo parece maravilloso y todos los días, literalmente, me despierto con esa sensación de que la vida es un misterio y un milagro. Esa sensación todavía no la he perdido.

Pero Koch cree que cada vez estamos más cerca de desmitificar la conciencia, y él intuye que el coeficiente matemático Φ y la IIT de Tononi son los que tienen la clave.

—Soy partidario entusiasta de esta teoría de la información integrada que afirma que, en principio, mediante el diagrama de conexiones de una persona, del *C. elegans* o de un

ordenador, seremos capaces de decir si sienten que son ellos. En definitiva, eso es la conciencia: la experiencia de uno mismo. Y también podremos decir qué experimenta el sistema en cada momento. Tenemos un mecanismo, un cerebro, un ordenador que se halla en este momento en tal o cual estado. Algunas neuronas están apagadas, otras activadas; unos transistores están funcionando, otros en reposo. La teoría dice que, al menos en principio, podemos predecir la experiencia de ese sistema, no atendiendo a la información de entrada y la información de salida, sino mirando el sistema por dentro, la matriz probabilística de transición y sus estados.

Koch afronta el reto difícil de convencer a otros. Hay un grupo pertinaz de filósofos y pensadores que no creen que la ciencia pueda resolver este problema. Son miembros de una escuela de pensamiento que recibe el nombre de misterianismo, y que defiende que hay misterios que estarán siempre más allá de los límites de la mente humana. En los primeros puestos de la lista de los misterianistas figura el problema difícil de la conciencia.

El nombre del movimiento—que proviene de una banda de rock, *Question Mark and the Mysterians* (El signo de interrogación y los misterianistas)—nació como una exageración burlesca concebida por el filósofo Owen Flanagan, que pensó que el punto de partida de estos filósofos era extremadamente derrotista. Como escribió él mismo: «El nuevo misterianismo es una postura posmoderna diseñada para hincar un clavo de traviesa en el corazón del cientifismo». Koch se ha visto con frecuencia envuelto en debates con filósofos misterianistas que piensan que anda descarriado en su busca de una respuesta. Así que le pregunté qué les dice a los que ponen en duda que se pueda saber alguna vez que un sistema está realmente sintiendo algo.

—Si llevamos al extremo esta postura, acabamos sin remedio en el solipsismo.

Se puede percibir la exasperación en la voz de Koch al ha-

blar de esta postura filosófica que afirma que el conocimiento de cualquier cosa situada fuera de nuestra mente nunca es firme. Nos remonta hasta la propuesta de Descartes de que lo único de lo que podemos estar seguros es de nuestra propia conciencia.

—Sí... El solipsismo es lógicamente consistente, pero aun así es sumamente improbable que, siendo el cerebro de todos los demás exactamente como el mío, solamente yo tenga conciencia y los demás estén disimulando. Es posible creer esto, sí, pero no es muy verosímil.

¿Pensaba Koch que aquellos que insisten en la imposibilidad de resolver el problema difícil tienen que cuestionar también la posibilidad de saber algo, sea lo que sea? Si uno llega a ese extremo, ¿no acaba sin remedio adoptando una visión del mundo absolutamente escéptica?

—Exactamente, y eso no me parece muy interesante. Puede uno ser un escéptico radical, pero eso no se presta a nada fácil. Cualquier teoría como la IIT es en el fondo una relación de identidad. Esta teoría concreta y otras como ella reivindican que la experiencia es idéntica a un cierto estado en ese espacio de qualia de dimensión superior, generado esencialmente por el conjunto de los diferentes estados que el sistema puede adoptar. Equivale a una configuración, a una constelación, a un politopo en este espacio de dimensión superior. Eso es la experiencia. Eso es lo que significa ser tú y es algo que yo puedo predecir, en principio... Es un proyecto empírico porque puedo decir: «Bueno, Marcus, ahora estás viendo algo rojo o justo ahora estás oliendo una rosa». Puedo aplicar el fMRI y ver que están activadas tus «neuronas del olor a rosa» o que está activada tu área del color rojo. Así que en principio éste es un proyecto completamente empírico.

Koch cree que esto es lo máximo a lo que se puede llegar si queremos explicar la conciencia. Casa muy bien con lo que significaría desarrollar una ciencia de la conciencia. ¿No es-

taría bien, por ejemplo, identificar una configuración en el cerebro, correlativa siempre con una percepción de dolor, del color rojo o de felicidad? Esto es algo que se podría corroborar con experimentos. Y si siempre se diera una misma correspondencia, ¿no podría decir en qué consiste experimentar el rojo, y que puedo generalizar ese conocimiento y decir que un ordenador puede experimentarlo?

Los misterianistas radicales aducirán que no se ha explicado cómo una red semejante da lugar a la sensación de percibir algo. Pero ¿no nos arriesgamos a pedir demasiado, hasta el extremo de caer en el solipsismo y deslizarnos hacia el escepticismo, para acabar argumentando que no podemos saber realmente nada sobre el universo? Comprendemos que la sensación de calor es justamente el movimiento de átomos. Nadie dice que no se haya explicado realmente por qué eso produce el calor. Hemos identificado qué es el calor. Creo que Koch afirmaría lo mismo de la conciencia.

Teóricamente la idea es muy atractiva, pero me intrigaba saber si Koch pensaba que podríamos alguna vez progresar hasta tal punto que fuera posible usar un escáner fMRI u otro dispositivo más sofisticado para saber lo que realmente alguien está sintiendo. ¿O quizá es demasiado complejo?

—Ése es un problema pragmático. Es el mismo que tuvo que encarar la termodinámica en el siglo XIX. No se podían calcular esas cosas. Pero al menos, en un caso sencillo, por ejemplo para una criatura con diez neuronas, las expresiones están perfectamente bien definidas y hay una única respuesta. El número máximo de neuronas que uno podría considerar es un problema práctico muy grave. ¿Podremos superarlo alguna vez? No lo sé, porque el problema se complica exponencialmente con el número de neuronas, lo cual es una mala noticia. Pero ése es un problema diferente.

La prueba definitiva de que entendemos lo que hace que yo sea «yo» es ver si seríamos capaces de construir un cerebro artificial que tuviera conciencia. ¿Hay alguna esperanza de que se pueda diseñar en el futuro una aplicación para mi teléfono móvil que tenga verdaderamente conciencia? Los humanos nos las arreglamos bastante bien para crear seres con conciencia. Mi hijo es un ejemplo de cómo podemos combinar diversas estructuras celulares, un óvulo y un poco de espermatozoide, que juntos tienen el equipo completo y las instrucciones para crear un nuevo organismo consciente. Bueno, confieso que estoy suponiendo que mi hijo es un ser consciente: algunos días por la mañana parece que está en el extremo zombi del espectro.

Hay algunos proyectos en marcha, asombrosamente ambiciosos, que pretenden elaborar un análisis del cableado de un cerebro humano de modo que pueda ser recreado en un ordenador. El Proyecto Cerebro Humano, idea original de Henry Markram, pretende conseguir en diez años un modelo funcional del cerebro humano que pueda ser descargado en un superordenador. «Va a ser el bosón de Higgs del cerebro, un arca de Noé del cerebro», declaró Markram. Para convertir su visión en realidad, la Comisión Europea le concedió una ayuda de mil millones de euros. Pero, cuando estén ya hechas, ¿estas simulaciones serán conscientes? Para mi sorpresa, Koch piensa que no.

—Supongamos que el proyecto cerebro de Markram es un éxito y conseguimos la simulación digital perfecta del cerebro humano. También hablará, por supuesto, porque es una simulación perfecta del cerebro humano, así que incluirá una simulación del área de Broca, que es la responsable del lenguaje. El ordenador no existirá como un ente consciente. Puede haber una cantidad mínima de Φ al nivel de un par de transistores individuales, pero nunca será parecido ni de lejos a un cerebro humano.

La clave es que el coeficiente Φ de Tononi va directo a la naturaleza del poder causa-efecto del mecanismo interno y no al comportamiento de la entrada-salida de datos. La conectividad típica en el interior de un ordenador consiste en un transistor que se comunica en la unidad de procesamiento central con otros cuatro transistores como máximo. Esto da lugar a un valor de Φ muy bajo, y por lo tanto a un nivel muy bajo de conciencia, según piensa Koch. Lo interesante será que, como es una simulación muy perfecta, proclamará a los cuatro vientos que es consciente, que tiene un mundo interno. Pero en opinión de Koch será mera palabrería.

—La razón es esencialmente similar al hecho de que si pones a un ordenador a simular un agujero negro, la masa simulada no tendrá ningún efecto sobre la masa real que se encuentra cerca del ordenador. El espacio no sufrirá ninguna distorsión en el entorno del ordenador. Del mismo modo, se podrá simular la conciencia en un ordenador, pero la entidad simulada no experimentará nada. Es la diferencia entre simular y emular. La conciencia surge del repertorio causa-efecto del mecanismo. Es algo físico.

La conciencia depende de cómo está montada la red. Una situación parecida se da con la red zombi que Tononi construyó con diez neuronas. Lo asombroso es que el procedimiento que Tononi usó para convertir una red de diez neuronas con un alto valor de Φ en una red zombi, con un valor de Φ igual a cero pero con el mismo repertorio de entradas-salidas, puede aplicarse también a la red del cerebro humano. Ambos poseerían el mismo comportamiento en cuanto a entradas-salidas, y sin embargo, a causa de las diferencias en los estados de transición internos, una tiene un alto valor de Φ , y la otra un valor de Φ igual a cero. Pero ¿cómo podríamos saber alguna vez que esto significa que la una es consciente y la otra un zombi?

Lo que me desconcierta es que todo esto parece subrayar la naturaleza prácticamente irresoluble del problema de la

conciencia. El coeficiente Φ es ciertamente una medida muy buena de la diferencia entre una simulación del cerebro y la auténtica naturaleza de la arquitectura del mismo. Define la diferencia entre una red zombi y la mente humana. Pero ¿cómo podemos saber realmente que la simulación zombi no es consciente? Está ahí, gritando desaforadamente: «¿Cuántas veces tengo que decirlo? Soy consciente, aquí dentro». Pero el coeficiente Φ dice que solamente aparenta ser consciente. Le explico al zombi que el coeficiente Φ me asegura que no tiene un mundo interior. Pero, lo mismo que haría un cerebro consciente, el zombi insiste: «Que sí». ¿No está aquí el meollo del problema? Solamente disponemos de los datos de entrada-salida para hacernos una idea del sistema que articula esas sensaciones. Podemos definir la conciencia como el valor de Φ , pero ¿no es esto finalmente algo que por su propia naturaleza está fuera del alcance de lo que la ciencia puede investigar empíricamente?

DESCARGANDO MI CONCIENCIA

Una de las razones por las que a Koch le gusta el coeficiente Φ como medida de la conciencia es que encaja con su creencia pampsiquista de que los seres humanos no somos los únicos entes con conciencia. Si la conciencia es la integración de la información a lo largo de una red, entonces se aplica por igual a cosas tan pequeñas como una ameba y a cosas tan grandes como todo el universo.

—Lo que dice, en definitiva, es que cualquier cosa que tenga un poder causa-efecto en ella misma poseerá cierto nivel de conciencia. La conciencia es, en última instancia, cuánta diferenciación te atribuyes a ti mismo, el poder causa-efecto que tienes por ti mismo. Así que, incluso si tomamos un sistema mínimo, como una célula—una sola célula ya es un sistema increíblemente complejo—, éste tiene cierto poder causa-efecto en sí mismo. Tiene cierto sentido sentirse ser

esa célula. Su valor de Φ será pequeño, pero mayor que cero. Puede ser un valor insignificante, pero implica cierto nivel de conciencia. Por supuesto, ésta es una intuición muy antigua.

Cuando le cuento a alguien que estoy investigando las cosas que nunca podremos saber, muchas veces me pregunta: ¿y vas a hablar del problema de la vida después de la muerte? Es un problema íntimamente ligado al de la conciencia. ¿Sobrevive nuestro Φ ? No hay ningún indicio de que sobreviva algo de nuestra conciencia después de la muerte. Pero ¿hay algún modo de saberlo? Si ya nos resulta difícil acceder a la conciencia de otra persona en vida, investigar su conciencia después de la muerte parece un reto imposible. Dada la correlación que hay entre la actividad del cerebro y la conciencia, parece sumamente improbable que pueda sobrevivir algo después de la muerte. Si fuera posible algún tipo de comunicación, podríamos tener ciertas esperanzas. Gracias a eso, al fin y al cabo, podemos investigar la conciencia que suponemos que poseen los que nos rodean.

Koch coincidía conmigo en que es muy improbable que algo de nuestro Φ sobreviva después de la muerte. En verdad, Koch había pasado algún tiempo debatiendo esta cuestión con un colaborador impensable.

—Hace un par de años pasé una semana en la India hablando con el Dalai Lama. Fue muy intenso. Cuatro horas por la mañana y cuatro más por la tarde, hablando de ciencia. Dedicamos dos días enteros a hablar de la conciencia. Los budistas llevan dos mil años explorando sus propias conciencias desde dentro, usando técnicas de meditación. Por el contrario, nosotros lo hacemos usando desde fuera el fMRI, los electrodos y la psicofísica, pero básicamente nuestras opiniones tienden a coincidir. Él simpatiza bastante con muchas de las ideas científicas y coincidimos en muchas cosas. Por ejemplo, él acepta sin problemas la idea de la evolución.

Pero también habría puntos de desavenencia, ¿no?

—La única cosa en la que disentiámos profundamente era en la idea de reencarnación. Yo no veo cómo eso podría funcionar. Habría que tener un mecanismo que traslade mi conciencia o mis recuerdos hasta la próxima vida. A menos que descubramos algo en la mecánica cuántica, y no soy lo suficiente experto en ella como para poder opinar, no veo ningún indicio que pueda apoyar la reencarnación.

Como señala Koch, si uno pretende responder a esta cuestión desde el punto de vista científico, se precisa disponer previamente de una explicación de cómo podría sobrevivir la conciencia después de la muerte del cuerpo. Ha habido algunas propuestas interesantes. Por ejemplo, si la conciencia corresponde en última instancia a patrones de información en el cerebro—quizá algo parecido a lo que Tononi defiende—, algunos argumentan que, teóricamente, la información siempre podrá reconstruirse. La paradoja de los agujeros negros y la información se ocupa de la cuestión de si la información se pierde cuando las cosas desaparecen en un agujero negro. Pero, siempre que evitemos un agujero negro como crematorio, la combinación de determinismo cuántico y reversibilidad significa que la información nunca se pierde. El físico religioso John Polkinghorne ofrece esto como un argumento para la posibilidad de vida después de la muerte: «Aunque ese patrón se disuelva como consecuencia de la muerte, parece perfectamente racional creer que será recordado por Dios y reconstituido en un acto divino de resurrección». Por supuesto, no haría falta recurrir a Dios para hacer realidad esta idea tan asombrosa. Algunas personas están ya tratando de asegurarse de que la información de su cerebro sea almacenada en alguna parte antes de que su soporte físico se averíe. La idea de descargar mi conciencia en mi teléfono móvil de modo que «él» se convierta en «mí» puede no estar tan lejos de la propuesta de Polkinghorne. Es como si Apple pudiera desempeñar el papel de Dios. «*Rapture for nerds*», éxtasis para cerebritos, como lo llama Koch.

Al enfrentarnos a una pregunta que no sabemos responder debemos elegir. Quizá la respuesta intelectualmente correcta sea permanecer agnóstico. Al fin y al cabo, eso es lo que significa haber encontrado una pregunta que no tiene respuesta. Por otro lado, creer en una u otra respuesta tendrá un impacto en la manera en que vivimos. Imaginemos que uno piensa que es único y que los demás son todos zombis: esta creencia tendría efectos enormes en la interacción de uno con el mundo. O, al revés, si llega un momento en el que uno piensa que una máquina es consciente, el hecho de apretar o no el botón de apagado se habrá cargado de connotaciones morales.

Algunos postulan que para resolver el problema de la conciencia tendremos que admitir en nuestra descripción del universo un nuevo elemento básico que genere la conciencia, uno que—como el espacio, el tiempo o la gravedad—no pueda reducirse a otra cosa. Todo lo que podemos hacer es explorar la relación entre este nuevo elemento y los que tenemos hasta la fecha. A mí esto me parece una evasiva. La conciencia emerge de un cerebro en desarrollo cuando se alcanza cierto umbral crítico, como el momento en el que el agua empieza a hervir y se convierte en gas. Hay muchos ejemplos en la naturaleza de estos puntos críticos en los que se produce una transición de fase. La cuestión es si la transición de fase da lugar a algo que no puede explicarse sin recurrir a crear una nueva entidad fundamental. Hay precedentes, por supuesto. Las ondas electromagnéticas se crean como consecuencia de la aceleración de partículas cargadas. No es un fenómeno emergente, sino un elemento fundamental nuevo del mundo natural.

O quizá la conciencia está asociada a otro estado de la materia, como los estados sólido o líquido. Se ha propuesto incluso un nombre para él: perceptronium, que se define como la sustancia más general susceptible de poseer una sensación subjetiva de autoconciencia. Este cambio de esta-

do sería consistente con la conciencia como fenómeno emergente. ¿O podría haber un campo de conciencia que se activara a partir de estados críticos de la materia, del mismo modo que el campo de Higgs proporciona masa a la materia? Parece una idea muy extravagante, aunque, para encarrar un concepto tan resbaladizo, tal vez necesitemos ideas un poco absurdas.

Algunos argumentan que nada físico explicará nunca el problema de qué hace que yo me sienta yo, que la misma existencia de la conciencia implica algo que trasciende nuestro reino físico. Pero si la mente puede mover la materia, seguramente debería existir algo físico que conecte estos dos reinos y que permita a la ciencia entrar de nuevo en el juego.

Quizá la cuestión de la conciencia no sea en absoluto científica, sino relativa al lenguaje. Ésta es la postura de una escuela filosófica que se remonta a Wittgenstein. En sus *Investigaciones filosóficas*, Wittgenstein explora el problema de un lenguaje privado. El proceso de aprender el significado de la palabra *mesa* pasa por que la gente señale a una mesa y diga: «Esto es una mesa». Si señalo algo que no corresponde a lo que la sociedad llama *mesa*, me corrigen. Wittgenstein pone en tela de juicio que el mismo principio sea aplicable a la palabra *dolor*. El dolor no se encarna en ningún objeto externo a nosotros, o que podamos señalar y decir «dolor». Podemos ser capaces de encontrar una correlación entre un resultado del escáner fMRI que siempre corresponda a mi sensación de dolor. Pero cuando señalamos la pantalla y decimos que eso es el dolor, ¿se trata realmente de lo que entendemos por dolor?

Wittgenstein pensaba que el problema de explorar los mundos privados de nuestros qualia y nuestras sensaciones concernía al lenguaje. ¿Como podemos compartir el significado de «me duele aquí»? Es imposible. «Tengo dolor de muelas» parece cualitativamente lo mismo que «tengo una mesa», y es tentador suponer que ambas frases dicen el mis-

mo tipo de cosas. Asumimos que existe una cosa que llamamos «mi dolor» con el mismo sentido que existe una cosa llamada «mesa». Parece que estamos diciendo algo, pero Wittgenstein pensaba que en realidad es como no decir nada: «Las confusiones que nos ocupan surgen, por así decirlo, cuando el lenguaje marcha en el vacío, no cuando trabaja».

Por ejemplo, si alguien tiene una sensación y me dice «Creo que esto es dolor», no tengo ningún modo de contradecirle. No tengo ningún criterio con el que comparar lo que esa persona está sintiendo con lo que yo entiendo por «dolor». Wittgenstein explora si es posible mostrarle a esa persona lo que es el dolor estrujándole un dedo y diciendo a la vez: «Esto es dolor». Si la persona responde, por ejemplo: «Sí, ya sé lo que significa “dolor”; lo que no sé es si *esto* que ahora siento lo es o no». Wittgenstein aduce que nos limitaríamos a encogernos de hombros y «tendríamos que tomar sus palabras como una extraña reacción con la que no sabemos qué hacer».

Podemos abordar el problema de identificar lo que pasa en nuestras cabezas imaginando que cada uno de nosotros tenemos una caja con algo dentro. Todos llamamos «escarabajo» a lo que llevamos en ella, pero no podemos ver lo que hay en las cajas de los demás, solamente lo que hay en la nuestra. Entonces, es perfectamente posible que cada uno tenga algo completamente distinto en su caja, o que lo que hay esté cambiando constantemente, o incluso que no haya nada. Pero todos lo llamamos «escarabajo». Para los que no tienen nada en la caja, la palabra *escarabajo* nombra la nada. No es ni siquiera un nombre. Luego, ¿significa algo la palabra *escarabajo*? ¿Son nuestros cerebros como las cajas y la conciencia como el escarabajo? ¿Nos permite por fin el escáner fMRI mirar dentro de la caja de otros y ver si su escarabajo es el mismo que el nuestro? ¿Rescata esta máquina a la conciencia de entre las garras de los juegos de palabras de Wittgenstein?

Wittgenstein explora cómo una frase, o una pregunta, nos engaña haciéndonos pensar que significa algo porque adopta exactamente la misma forma que una verdadera frase, pero cuando la examinamos con más cuidado, vemos que en realidad no tiene ningún sentido. Muchos filósofos piensan que ahí reside el problema de la conciencia. No compete a la ciencia, y dejará de ser un desafío cuando reconozcamos que se trata simplemente de un equívoco.

Daniel Dennett es uno de estos filósofos que siguen la estela de Wittgenstein. Cree que dentro de unos años reconoceremos que no tiene mucho sentido mantener este largo debate sobre la idea de conciencia como algo que está más allá de las cosas físicas que a nosotros nos parece necesario que tengan conciencia. Así, por ejemplo, si encontramos una máquina o un organismo que funciona exactamente como esperaríamos que funcionara si tuviera conciencia, deberíamos definir sin más esa cosa como consciente. La cuestión de si es un zombi o no, de si siente realmente algo o no, debería arrinconarse. Si no hay ningún modo de distinguir al zombi inconsciente del humano consciente, ¿qué sentido tiene conservar un nombre para describir esa diferencia? Solamente cuando podemos saber que existe una diferencia tiene sentido disponer de una palabra para describirla.

Dennett cita el vitalismo para apoyar su postura. El vitalismo sufrió ese destino: hemos descartado la idea de que hay algún ingrediente extra especial, un *élan vital*, que insufla vida a una colección de células. Si nos muestran una colección de células que poseen la capacidad de reproducirse, que dicen miau y ronronean como un gato, sería muy difícil convencernos de que no se trata de un ser vivo. Algunos creen que las hipótesis sobre la conciencia seguirán el mismo camino que el vitalismo. El vitalismo fue un intento por explicar cómo un sistema físico podía hacer las cosas asociadas a un organismo vivo: reproducirse, autoorganizarse, adaptarse. Una vez explicados estos mecanismos, teníamos resuelto

el problema de la vida y no se necesitaba ya *élan vital* alguno. Pero en el caso de la conciencia, algunos creen que la cuestión de cómo un sistema material físico engendra una experiencia subjetiva no puede ser respondida con idénticos mecanismos, por su misma naturaleza subjetiva.

Con la llegada de nuevos equipos y nuevas técnicas extraordinarias, nuestro mundo interno es ahora menos opaco. Las actividades mentales son privadas, pero las interacciones físicas con el mundo son públicas. ¿Hasta qué punto podemos acceder al dominio privado analizando el dominio público? Probablemente lleguemos a una situación en la que podamos saber si una persona está pensando en Jennifer Aniston en lugar de en el teorema de Pitágoras con sólo ver qué neuronas están activadas.

Pero conseguir hacerse una idea de qué se siente siendo tú, ¿es posible sólo comprendiendo el encendido de las neuronas? ¿Podremos alguna vez distinguir lo consciente de lo zombi? En el sistema digestivo albergamos unos 100 millones de neuronas—el 0,1 % de las que tenemos en el cerebro—, pero no es consciente. ¿O sí lo es? ¿Cómo podría saber si posee o no una conciencia distinta de la mía? Ésta es la clave en la cuestión de la conciencia. Mi estómago podría empezar a comunicarse conmigo, pero ¿cómo saber que percibe el rojo o que se enamora como yo? Podría escanearlo, sondearlo con electrodos, descubrir que el cableado y el encendido coinciden con los del cerebro de un gato, que tiene aproximadamente el mismo número de neuronas, pero ¿podremos pasar de ahí?

La cuestión de distinguir a los zombis de los seres conscientes podría quedar como una de las cuestiones que la ciencia no puede responder. La prueba de Turing a la que sometí a mi teléfono móvil al principio de nuestro viaje a la mente apuntaba ya hacia este reto. ¿Era el robot parlante zombi el que quería ser poeta o el que quería hacerse rico? ¿Es un robot parlante tan inteligente como para hacer una bro-

ma sobre la afirmación de Descartes «Pienso, luego existo»? ¿Acabará en algún momento concertando citas? ¿Quién es el zombi y quién es consciente?

Al terminar nuestra conversación a través de Skype, Koch reconoció que no hay ninguna garantía de que algún día sepamos la respuesta a algunas preguntas.

—No hay ninguna ley en el universo que diga que tenemos el poder cognitivo de explicarlo todo. Si fuéramos perros... enténdeme, yo aprecio a mi perro; los perros son plenamente conscientes, pero no comprenden los impuestos, ni la relatividad especial, ni la más sencilla de las ecuaciones diferenciales. La mayoría de las personas tampoco entiende las ecuaciones diferenciales. Pero, por la misma razón, me disgusta que la gente diga que nunca entenderemos esto o aquello. No se puede decir eso. Sí, no hay ninguna garantía. Sin embargo, es una actitud realmente derrotista, ¿no? Quiero decir que ¿qué clase de programa de investigación puede ser ése, Marcus? Tirar la toalla y decir olvidémoslo, no lo entenderemos nunca, no hay esperanzas. Eso es derrotismo.

Con este alegato a favor de no renunciar a contestar las preguntas que no tienen respuesta silbándome en los oídos, doy por terminada la conversación por Skype. El rostro de Koch desaparece de la pantalla y me quedo con cierta sensación de desasosiego. ¿Estaba seguro de que era realmente Koch el que se hallaba al otro lado de la línea? ¿O habrá diseñado un avatar generado algorítmicamente para atender la avalancha de preguntas que le llegan sobre si resolveremos alguna vez el problema difícil de la conciencia?

SÉPTIMA FRONTERA:
EL «CRACKER» NAVIDEÑO

El número es el que rige las formas y las ideas,
y la causa de los dioses y de los demonios.

PITÁGORAS

LA FRASE ESCRITA EN EL DORSO
DE ESTA TARJETA ES FALSA

LA FRASE ESCRITA EN EL DORSO
DE ESTA TARJETA ES CIERTA

Decepcionado por la aburrida oferta de *Christmas crackers* que había en las tiendas, este año decidí obsequiar a mi familia con mis propios *crackers* matemáticos caseros. Cada *cracker* incluía un chiste matemático y una paradoja. Mi familia opinó que los chistes tenían más matemáticas que gracia. Que el lector decida... ¿Cuántos matemáticos se necesitan para cambiar una bombilla? 0,99999 y así hasta el infinito. Si el chiste no le hace gracia, no sufra. A mi familia tampoco se la hizo. Por si el lector no lo pilla, lo explico, aunque uno no debería nunca explicar un chiste. La clave es que se puede probar que 0,99999 y así hasta el infinito es igual a 1.

Las paradojas eran un poco menos malas. Una contenía una cinta de Moebius, un objeto geométrico aparentemente paradójico que tiene solamente un lado. Si tomamos una cinta larga de papel, le damos media vuelta a un extremo y lo pegamos con el otro, se obtiene una superficie con un solo lado. Esto puede comprobarse intentando colorear uno de los lados de la banda: al final se habrá coloreado la banda completa. Dicha banda tiene la sorprendente propiedad de que si se corta longitudinalmente por la línea media, no

se convierte en dos lazos, como cabría esperar, sino que sigue de una pieza. Continúa siendo un solo lazo pero con dos vueltas en él.

El *cracker* que me tocó a mí no estaba tan mal, si se me permite decirlo. También el chiste era bastante bueno. ¿Qué significa la B en Benoît B. Mandelbrot? Benoît B. Mandelbrot. (Si al lector no le hace gracia, lo que se le ha pasado por alto es que Mandelbrot fue el inventor de los objetos fractales sobre los que hablamos en la primera «frontera», esas formas geométricas que nunca se simplifican, por mucho que nos acerquemos a ellas). La paradoja era una de mis favoritas de todos los tiempos. Consistía en las dos frases que encabezan este capítulo, una en el anverso y otra en el reverso de una tarjeta. Siempre me han gustado, y desazonado en la misma medida, este tipo de juegos de palabras. Uno de mis libros favoritos cuando era adolescente fue *¿Cómo se llama este libro?* La obra estaba llena de disparatados juegos de palabras que casi siempre explotaban, como su propio título, las implicaciones de las autorreferencias.

He aprendido a no sorprenderme por las frases, construidas con el lenguaje natural, que dan lugar a paradojas como la producida por la lógica circular de las dos frases de mi tarjeta sorpresa. Poder formar frases con sentido no proporciona por sí mismo un método para asignarles valores de verdad de modo que resulten coherentes.

Creo que la naturaleza resbaladiza del lenguaje es una de las razones por las que me vi impelido hacia las certezas de las matemáticas, en las que no se toleran este tipo de ambigüedades. Pero, como explicaré en esta «frontera», la paradoja de mi *cracker* fue utilizada por uno de los lógicos matemáticos más grandes de todos los tiempos, Kurt Gödel, para probar que también esta disciplina que yo escogí contiene enunciados sobre los números que son ciertos pero que nunca seremos capaces de demostrar que lo son.

LAS CIENCIAS FRENTE A LAS MATEMÁTICAS

El deseo de certeza, de saber—de saber realmente—, fue una de las razones principales por las que escogí estudiar matemáticas, en vez de alguna de las otras ciencias. En las ciencias, las cosas que creemos que sabemos sobre el universo son modelos que casan con los datos. Para cumplir los requisitos de una teoría científica, los modelos tienen que poder probarse que son falsos. La razón por la que perduran, si lo hacen, es que todas las pruebas los apoyan. Si se descubren nuevas pruebas que lo contradicen, debemos cambiar el modelo. Por su propia naturaleza, una teoría científica es aquella que potencialmente puede ser descartada. En cuyo caso, ¿podremos saber verdaderamente en algún momento que es correcta?

Creíamos que el universo era estático, pero después nuevos descubrimientos revelaron que las galaxias se alejan de nosotros. Creíamos que el universo se expandía a un ritmo decreciente, debido a la atracción gravitatoria. Hasta que descubrimos que la expansión era acelerada. Establecimos este modelo con la idea de que la energía oscura disgregaba el universo, pero está a la espera de que se demuestre que es incorrecto, aunque va ganando credibilidad a medida que se van encontrando nuevas pruebas. Finalmente, podríamos muy bien dar con el modelo correcto del universo, a salvo de nuevas revelaciones. Pero nunca lo sabríamos con total certeza.

Éste es uno de los rasgos más fascinantes de las ciencias: están en continua evolución, siempre hay nuevas interpretaciones. Nos pueden dar pena las viejas interpretaciones que se desdibujan en el olvido. Por supuesto, las nuevas interpretaciones surgen de las viejas. Como científico, uno vive con el miedo de que su teoría pueda ser la moda del momento y ganadora de premios, y que luego sea superada súbitamente. Ni el modelo atómico del pudín de pasas, ni la idea del tiempo absoluto, ni el hecho de que las partículas tienen una localización y un momento identificables figuran ya en

las primeras posiciones de la lista de éxitos científicos. Han sido sustituidas por nuevas interpretaciones.

El modelo de universo sobre el que leí de adolescente ha sido reescrito por completo. No puede decirse lo mismo de los teoremas matemáticos que entonces aprendí. Son tan ciertos hoy como el primer día que los leí y tan ciertos como el día que fueron descubiertos. En algunos casos, han pasado más de dos mil años desde ese día. Como adolescente inseguro y granujiento que era, la certeza que estos teoremas prometían me pareció especialmente atractiva. Eso no significa que las matemáticas sean estáticas. Se hallan en constante crecimiento a medida que lo desconocido se vuelve conocido, y lo conocido no sólo sigue siéndolo, sino que cobra solidez y se convierte en el preámbulo de la nueva gran interpretación. ¿Por qué el proceso para alcanzar las verdades matemáticas es tan diferente del que tiene que afrontar el científico, que nunca puede realmente saber?

El ingrediente más importante de la alacena del matemático es la demostración.

LA DEMOSTRACIÓN: EL CAMINO HACIA LA VERDAD

Existen pruebas de que ya se investigaba en matemáticas en el segundo milenio a. C. Hay tablillas de arcilla en Babilonia y papiros en Egipto que muestran cálculos sofisticados e intentos de solución de problemas difíciles: estimaciones de π ; la fórmula para el volumen de una pirámide; algoritmos para resolver ecuaciones cuadráticas. Pero, en general, estos documentos hablan de procedimientos que pueden ser aplicados a problemas particulares para deducir las soluciones. No encontramos justificaciones de por qué estos procedimientos han de funcionar siempre, más allá de la prueba convincente de que han funcionado en los miles de ejemplos que han sido descifrados en las tablillas hasta la fecha. Los cono-

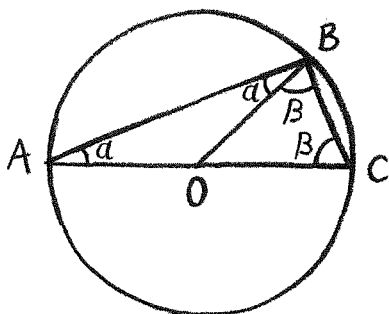
cimientos matemáticos se basaban en la experiencia y recordaban, por lo tanto, a las ciencias experimentales. Los métodos conocidos se adaptaban convenientemente cuando surgía un problema en el que no era directamente aplicable el algoritmo de siempre.

Las cosas empezaron a cambiar en torno al siglo V a. C., cuando los griegos le hincaron el diente a estas cuestiones. Los algoritmos iban acompañados de argumentos que justificaban por qué siempre acabarían haciendo escrupulosamente lo que decía la tablilla. No se trataba sencillamente de que hubiera funcionado las mil últimas veces, y que por lo tanto era muy probable que funcionara una vez más, sino que el argumento explicaba por qué el método funcionaría siempre. Había nacido la idea de demostración.

Por lo que se sabe, Tales de Mileto fue el primer creador de una demostración matemática. Probó que si se toma un punto en una circunferencia y se une con los dos extremos de un diámetro de la circunferencia, se crea un ángulo recto entre esos dos segmentos. No importa qué circunferencia se tome ni qué punto se escoja en ella: el ángulo formado siempre será un ángulo recto. No es que sea aproximadamente un ángulo recto ni que sea así porque parece ser cierto en todos los ejemplos que se dibujen, sino porque es una consecuencia de las propiedades de las circunferencias y las rectas.

La demostración de Tales lleva al lector, mediante una serie de inteligentes pasos lógicos, desde aquello que no tiene duda de que es cierto hasta este nuevo conocimiento, algo que en principio no resulta obvio sólo con mirar una circunferencia. La idea es dibujar un tercer segmento que vaya desde el punto inicial B de la circunferencia hasta el centro O de la misma.

¿Por qué ayuda esto? Ahora tenemos dos triángulos con dos lados de la misma longitud. Esto significa que en ambos triángulos los dos ángulos que no están en el centro O de la



circunferencia son iguales. Éste es entonces ya un hecho probado sobre ambos triángulos. Consideremos ahora el triángulo grande que se dibujó primeramente. Sus ángulos suman $2\alpha + 2\beta$. Combinamos esto con el conocimiento previo que tenemos de que los ángulos de un triángulo suman 180 grados, y resulta que $\alpha + \beta$ ha de ser igual a 90 grados, tal y como afirmó Tales.

Cuando de niño vi por primera vez esta demostración, me emocioné. Podía observar en los dibujos que el ángulo que se formaba en el borde de la circunferencia era de 90 grados, pero ¿cómo podía saberlo con seguridad? Mi mente buscaba alguna razón por la que tenía que ser eso cierto. Y entonces, al pasar de página, al ver el tercer segmento que dibujó Tales hasta el centro de la circunferencia y al seguir las implicaciones lógicas que se derivaban de ahí, comprendí súbitamente con una claridad deslumbrante por qué ese ángulo tiene que tener 90 grados.

Obsérvese que ya en esta demostración vemos cómo el edificio matemático se va construyendo sobre cosas probadas, como que los ángulos de un triángulo suman 180 grados. El descubrimiento de Tales se convierte a su vez en un nuevo ladrillo sobre el que construir el tramo siguiente del edificio matemático.

La demostración de Tales es una de las muchas que aparecen en los *Elementos* de Euclides, considerado por muchos

el patrón que refleja en qué consisten las matemáticas y sus demostraciones. El libro comienza con una serie de constituyentes básicos, los axiomas, que son afirmaciones tan contundentemente obvias que uno los acepta sin titubeos como cimientos seguros sobre los que empezar a construir argumentos lógicos.

La idea de demostración no se creó aisladamente, de la nada. Más bien surgió paralelamente al desarrollo de un nuevo estilo de escritura que idearon los antiguos griegos. El arte de la retórica, formulado por Aristóteles y otros, proporcionó un nuevo tipo de discurso cuyo fin era persuadir al público. Ya fuera en un contexto legal o en un debate político, o simplemente a la hora de narrar un suceso, el orador embarcaba al público en un viaje lógico en su intento de convencer a los oyentes de su propia postura. Las matemáticas de Egipto y Babilonia surgieron con la construcción y las mediciones vinculadas a las nuevas ciudades que crecieron a orillas del Nilo y del Éufrates. Esa nueva necesidad de lógica y de argumentos retóricos nació de las instituciones políticas de las ciudades-estado que florecieron en el corazón del imperio griego.

Para Aristóteles, la retórica era una combinación de pura lógica con otros métodos diseñados para manejar las emociones del público. Las demostraciones matemáticas encajan dentro de la lógica. Pero una demostración es también algo parecido a contar una historia. Y por eso el desarrollo de lo que es una demostración en aquel momento y lugar tiene probablemente tanto que ver con los sofisticados argumentos contruidos por dramaturgos como Sófocles y Eurípides y con los diálogos filosóficos de Aristóteles y Platón.

A su vez, las exploraciones matemáticas de los griegos fueron más allá de los algoritmos funcionales para la construcción y las mediciones, y llegaron a sorprendentes descubrimientos que se parecían más a narraciones matemáticas para encantar a los lectores.

Una demostración es una narración lógica que lleva al lector desde un lugar conocido hasta un destino desconocido, nunca antes visitado. Como las aventuras de Frodo en *El Señor de los Anillos* de Tolkien, una demostración es la descripción del viaje desde la Comarca hasta Mordor. Dentro de los confines de las tierras conocidas de la Comarca se encuentran los axiomas de las matemáticas, las verdades autoevidentes de los números, junto con aquellas proposiciones que ya han sido demostradas. Éste es el marco para el arranque de las pesquisas. El viaje desde este territorio familiar está regido por las reglas de la deducción matemática, como los movimientos legítimos de una pieza del ajedrez, que prescriben los pasos permitidos a través de este mundo. A veces se llega a lo que parece un callejón sin salida y es preciso desviarse hacia un camino lateral, avanzando hacia los lados o incluso hacia atrás con el fin de encontrar una vía para sortear los obstáculos. A veces hay que esperar la llegada de nuevos personajes matemáticos, como los números complejos o el cálculo diferencial, para poder proseguir el viaje. La demostración es la narración del viaje y el mapa en el que figuran las coordenadas del mismo. El cuaderno de bitácora del matemático.

Para hacerse un sitio en el canon matemático no es suficiente con que el viaje produzca un enunciado verdadero sobre los números o los entes geométricos. Es preciso sorprender, deleitar y conmover al lector. Debe contener una pizca de drama y de riesgo. Las matemáticas son algo más que una colección de enunciados ciertos sobre números, igual que la literatura es algo más que el conjunto de posibles combinaciones de palabras o la música algo más que el conjunto de posibles combinaciones de notas. Las matemáticas involucran un juicio estético y una elección. Y ésta es probablemente la razón por la que el arte de la demostración matemática surgió en un período en el que florecía el gusto por contar historias. La idea de demostración debe tanto al pathos como al logos de la retórica de Aristóteles.

Aunque muchas de las primeras demostraciones geométricas son constructivas, los antiguos griegos también usaron sus nuevas herramientas matemáticas para probar que ciertas cosas son imposibles, que están fuera del alcance del conocimiento. El descubrimiento, como vimos, de que la raíz cuadrada de 2 no puede escribirse como una fracción es un ejemplo llamativo.

La demostración tiene un carácter muy narrativo, que embarca al lector en un viaje que parte de la suposición de que la longitud sí que puede expresarse como una fracción. Según la historia se va desarrollando con inocencia, uno se ve succionado más y más por la madriguera del conejo hasta que se llega a una conclusión completamente absurda: que los números impares son pares y viceversa. La moraleja del cuento es que la fracción imaginaria que representaba en principio esa longitud tiene que ser una ilusión. (Para el que quiera asomarse un poco más a la madriguera del conejo, la historia se reproduce en el recuadro siguiente).

Aquellos que se encontraron por primera vez con números como la raíz cuadrada de 2 debieron de pensar que estaban ante algo que por su propia naturaleza escapaba al conocimiento completo. Conocer un número era escribirlo, expresarlo en términos de números conocidos. Pero aquí había un número que parecía desafiar todo intento por determinar su valor.

PRUEBA DE LA IRRACIONALIDAD DE LA RAÍZ CUADRADA DE 2

Sea L la longitud de la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos tienen ambos una longitud igual a 1. El teorema de Pitágoras implica que un cuadrado construido sobre la hipotenusa tendrá la misma área que la suma

de las áreas de los cuadrados contruidos sobre los catetos. Pero estos cuadrados pequeños tienen ambos área igual a 1, mientras que el cuadrado grande tiene área L^2 . Por lo tanto, L es un número cuyo cuadrado es igual a 2.

Supongamos que L es de hecho igual a una fracción $L = p/q$.

Podemos suponer que p o q es impar. Si numerador y denominador fueran pares, podríamos dividir ambos por 2 las veces que fueran necesarias hasta que uno de ellos fuera impar.

Como $L^2 = 2$, se deduce que $p^2/q^2 = 2$.

Multiplicando ambos miembros por q^2 , resulta $p^2 = 2 \times q^2$.

Entonces, ¿es p par o impar? Bueno, p^2 es par, así que p ha de ser también par, porque impar por impar es impar. De modo que $p = 2 \times n$ para algún número n . Como p es par, el impar ha de ser q . Pero, un momento...

$2 \times q^2 = p^2 = (2 \times n)^2 = 2 \times 2 \times n^2$,
así que podemos dividir ambos miembros por 2 y obtenemos

$$q^2 = 2 \times n^2.$$

Recordemos que habíamos probado que q era impar.

Así que q^2 es también impar. Pero ¡el miembro derecho de esta ecuación es par! Entonces, si suponemos que L es expresable como una fracción, llegamos a la conclusión de que par = impar. Esto es claramente absurdo, de modo que nuestra suposición original de que L puede escribirse como una fracción ha de ser falsa.

Creo que ésta es una de las demostraciones más deslumbrantes de las matemáticas. Con sólo un poco de lógica hemos demostrado que hay una longitud tal que precisamos el infinito para expresarla.

Fue un momento extraordinario en la historia de las matemáticas: la creación de un tipo de número verdaderamente nuevo. Se podría haber asumido la postura de que la ecua-

ción $x^2 = 2$ no tiene solución. En aquel momento, los números conocidos no podían resolver exactamente esta ecuación. De hecho, hasta el siglo XIX las matemáticas no alcanzaron el grado de sutileza suficiente para dotar de sentido a ese número. Y sin embargo, intuitivamente sentimos que existe. Uno podía verlo: ahí estaba, era la longitud del lado de un triángulo. Finalmente los matemáticos se atrevieron a dar ese paso osado de añadir nuevos tipos de números a nuestra caja de herramientas matemáticas, de modo que pudiéramos resolver esas ecuaciones.

Había también otras ecuaciones que parecían desafiar la existencia de solución, en las que la respuesta no era tan obvia como en el caso de la raíz cuadrada de 2, y aun así nos las arreglamos para crear soluciones. Resolver la ecuación $x + 3 = 1$ parece fácil desde nuestro punto de vista moderno: $x = -2$. Pero para los griegos no había ningún número que resolviera esa ecuación. Diofanto la tacha de absurda. Para los matemáticos como Diofanto, los números eran entes geométricos: cosas reales que existían, longitudes de segmentos. No había ningún segmento que al añadirle otro de longitud tres se convirtiera en uno de longitud uno.

Otras culturas no fueron derrotadas tan fácilmente por esta ecuación. En la antigua China los números servían para contar el dinero, y el dinero con frecuencia aparecía en forma de deudas. Podía entonces darse la circunstancia de que, añadiendo tres monedas a mi bolsillo, acabara encontrando solamente una en él. Una deuda con un amigo podría ser la responsable de haberse tragado las dos monedas que faltan. En el año 200 a. C. los matemáticos chinos describían los números usando palillos rojos; pero si representaban deudas, usaban palillos negros. Éste es el origen de la expresión «estar en números rojos», aunque en algún tramo de la historia se intercambiaron los colores.

Fueron los indios, en algún momento del siglo VII, los que desarrollaron una teoría de los números negativos. En con-

creto, Brahmagupta dedujo algunas de las propiedades matemáticas importantes de estos números: por ejemplo, que «una deuda multiplicada por una deuda es una fortuna» o que menos por menos es más. (Curiosamente, esto no es una regla, es una consecuencia de los axiomas de las matemáticas. Es un reto divertido probar por qué tiene que ser así). Los europeos no se convencieron de que había números que podían resolver ese tipo de ecuaciones hasta el siglo xv. De hecho, el uso de los números negativos llegó a estar prohibido en la Florencia del siglo xiii.

Siguieron apareciendo nuevos números, especialmente cuando las matemáticas tuvieron que abordar el problema de resolver una ecuación como $x^2 = -1$. A primera vista, parece imposible. En efecto, si tomamos un número positivo y lo elevamos al cuadrado, el resultado es un número positivo y, como probó Brahmagupta, un número negativo elevado al cuadrado también es positivo. Cuando los matemáticos del Renacimiento consideraron esta ecuación, su primera reacción fue suponer que era imposible de resolver. Entonces el matemático italiano Rafael Bombelli tomó una decisión radical: supuso que había un nuevo número cuyo cuadrado era igual a -1 , y descubrió que este nuevo número podía usarse para resolver toda una colección de ecuaciones que hasta entonces se había pensado que eran irresolubles. Curiosamente, este número imaginario a veces era preciso solamente en los cálculos intermedios y no aparecía en el resultado final, en el que quedaban solamente números normales con los que la gente estaba ya familiarizada y que resolvían claramente la ecuación considerada.

Era algo así como alquimia matemática, pero muchos rehusaron admitir a los nuevos números de Bombelli en el canon de las matemáticas. Descartes escribió sobre ellos en tono bastante despectivo, y los despachó como números imaginarios. Con el paso del tiempo, más matemáticos comprendieron su poder y también el hecho de que no parecían dar

lugar a contradicciones en las matemáticas, en el caso de ser admitidos. Hasta principios del siglo XIX no encontraron su lugar dentro de las matemáticas, gracias en parte a una interpretación geométrica que ayudó a los matemáticos a visualizar estos números imaginarios.

Los números corrientes (o lo que los matemáticos llaman ahora números reales) se representaban a lo largo de una recta que recorría horizontalmente la página. Los números imaginarios como i , el nombre que recibió la raíz cuadrada de -1 , fueron representados en el eje vertical. Esta representación bidimensional de los números imaginarios o complejos fue crucial a la hora de aceptar a los recién llegados. El poder de esta representación gráfica quedó manifiesta con el descubrimiento de que la geometría de la representación reflejaba la aritmética de estos números.

Más allá de esa frontera alcanzada, ¿existen otros números todavía por descubrir? Podríamos tratar de escribir otras ecuaciones extrañas con la esperanza de obtener así más números nuevos. Por ejemplo, ¿qué pasaría si consideramos la ecuación $x^4 = -1$?

Quizá para resolver esta ecuación necesitaremos nuevos números. Pero uno de los grandes teoremas del siglo XIX, llamado ahora el teorema fundamental del álgebra, probó que, usando el número imaginario i y los números reales, podemos resolver cualquier ecuación que queramos. Por ejemplo, si tomamos

$$x = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} i$$

y elevamos a la cuarta potencia, la respuesta es -1 . Ya se había alcanzando entonces la frontera, y no se encontrarán nuevos números tratando de resolver ecuaciones.

La demostración de la irracionalidad de la raíz cuadrada de 2 por parte de los antiguos griegos fue la primera de una serie de demostraciones matemáticas que muestran que ciertas cosas son imposibles. Otra prueba de imposibilidad fue el concepto «cuadratura del círculo». De hecho, la idea matemática de la cuadratura del círculo se ha aclimatado en muchas lenguas como sinónimo de cosa imposible. La cuadratura del círculo se enmarca dentro de los desafíos geométricos que a los antiguos griegos les gustaba plantear e intentar resolver, usando una regla (sin graduar) y un compás (para construir arcos de circunferencia). Descubrieron métodos ingeniosos para construir con estos instrumentos triángulos equiláteros perfectos, pentágonos y hexágonos regulares.

Cuadrar el círculo consiste en tratar de usar esas dos herramientas para construir, a partir de un círculo dado, un cuadrado cuya área sea la misma que la del círculo del que se partió. A pesar de lo obstinadamente que reflexionaban los griegos, el problema les superó. Un desafío imposible y parecido fue planteado por el oráculo de la isla de Delos. Los habitantes de esta isla griega habían consultado al oráculo solicitando consejo sobre cómo vencer una plaga que el dios Apolo había enviado sobre ellos. El oráculo contestó que tendrían que duplicar el volumen del altar de Apolo, que era un cubo perfecto. Platón interpretó esto como el reto de construir, usando la regla y el compás, un segundo cubo cuyo volumen fuera el doble del volumen del cubo original.

Si el segundo cubo ha de tener el doble del volumen del original, eso significa que su arista ha de tener una longitud igual a la raíz cúbica de 2 multiplicada por la longitud de la arista original. Por lo tanto, el desafío era construir una longitud igual a la raíz cúbica de 2. Construir la raíz cuadrada de 2 era fácil, ya que aparece como la diagonal del cuadrado de lado unidad; pero la raíz cúbica de 2 resultó ser tan difícil que los habitantes de Delos no pudieron resolver el proble-

ma. Quizá el oráculo quiso distraer a los residentes de Delos con un poco de matemáticas y de geometría para desviar su atención de los problemas sociales, más acuciantes, que tenían que afrontar.

Duplicar el cubo, cuadrar el círculo y un tercer problema que consistía en trisecar el ángulo, resultaron ser todos imposibles. Pero hubo que esperar hasta el siglo XIX para que los matemáticos pudieran probar, más allá de toda duda, que no había ninguna manera de conseguirlo. Fue el desarrollo de la teoría de grupos—un lenguaje para comprender la simetría que uso en mis propias investigaciones—el que ofreció la clave para probar la imposibilidad de estas construcciones geométricas. Resulta que las únicas longitudes que pueden construirse con regla y compás son las que surgen como soluciones de ciertos tipos de ecuaciones algebraicas.

En el caso de cuadrar el círculo, el desafío requiere construir, usando regla y compás, un segmento de recta de longitud igual a la raíz cuadrada de π a partir de un segmento de longitud unidad. Pero en 1882 se probó que π no solamente es un número irracional, sino también un número trascendente, lo cual quiere decir que no es solución de ninguna ecuación algebraica. Esto implica a su vez que es imposible cuadrar el círculo.

Las matemáticas son notablemente hábiles a la hora de demostrar que ciertas cosas son imposibles. Uno de los teoremas más famosos de los libros de matemáticas es el último teorema de Fermat, que afirma que es imposible encontrar números enteros que sean soluciones de la ecuación

$$x^n + y^n = z^n$$

cuando n es mayor que 2. Esto contrasta con el caso $n = 2$, que corresponde a la ecuación que Pitágoras descubrió en relación a los triángulos rectángulos. Si $n = 2$, hay muchas soluciones, por ejemplo $3^2 + 4^2 = 5^2$. De hecho, hay infinitas

soluciones, y los antiguos griegos hallaron una fórmula para producirlas todas. Pero normalmente es una tarea mucho más sencilla dar con la solución que probar que nunca encontraremos números que satisfagan la ecuación de Fermat.

Es sobradamente conocido que Fermat creyó que sabía cómo probar su teorema, y anotó en el margen de su ejemplar de la *Aritmética* de Diofanto que éste era demasiado estrecho para su maravillosa prueba. Pasaron otros 350 años hasta que mi colega de Oxford Andrew Wiles presentara por fin un argumento convincente para explicar por qué nunca encontraremos números enteros que resuelvan las ecuaciones de Fermat. La demostración de Wiles ocupa más de cien páginas, a las que hay que sumar las miles de teoría previa sobre las que aquéllas se apoyan. Así que ni siquiera un margen excepcionalmente ancho hubiera bastado.

La demostración del último teorema de Fermat es un *tour de force*. Considero un privilegio haber vivido en los tiempos en los que se encajaron las últimas piezas de la prueba.

Antes de que Wiles probara la imposibilidad de encontrar una solución, cabía la perspectiva de que pudiera haber algunos números especiales que resolvieran una de esas ecuaciones. Recuerdo una gran broma del primero de abril, el día de los inocentes en el mundo anglosajón, que circuló entre los matemáticos más o menos en la misma época en la que Wiles anunció su demostración. La broma era que un conocido especialista de teoría de números de Harvard, Noam Elkies, había elaborado una demostración no constructiva de que existían algunas soluciones de ese tipo. Fue una broma para el primero de abril muy ingeniosa, porque el calificativo «no constructiva» significaba que su creador no podía decir qué números eran soluciones de alguna de las ecuaciones de Fermat, sino simplemente que su demostración implicaba que existían tales números. Lo bueno es que mucha gente recibió el mensaje reenviado varios días después del primero de abril, sin pistas para intuir que se trataba de una inocentada.

Inocentada o no, la comunidad matemática estuvo 350 años sin saber si había soluciones o no. No sabíamos. Pero por fin Wiles nos sacó de dudas. Su demostración implica que, por muchos números que probemos, nunca encontraremos tres que satisfagan una de las ecuaciones de Fermat.

QUEDÁNDOSE SIN NEURONAS

Vivimos en una edad de oro para las matemáticas, en la que se han resuelto por fin algunos de los grandes problemas abiertos. En 2003, el matemático ruso Grigori Perelman probó uno de los grandes retos de la geometría, la conjetura de Poincaré. Pero hay todavía muchos enunciados sobre los números y las ecuaciones cuyas demostraciones se nos escapan: la hipótesis de Riemann, la conjetura de los primos gemelos, la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer, la conjetura de Goldbach.

En mis propias investigaciones, he dedicado los últimos veinte años a tratar de aclarar si la llamada conjetura PORC es cierta o no. Fue formulada hace más de cincuenta años por Graham Higman, matemático de Oxford, que pensó que el número de grupos con un número dado de simetrías vendría expresado por bonitas expresiones polinomiales (de ahí viene la P de PORC). Por ejemplo, el número de grupos con p^6 simetrías, donde p es un número primo, viene dado por una expresión cuadrática en p : es $p^2 + 39p + c$ (donde c es una constante que depende del resto que se obtiene cuando se divide p por 60).

Mis propias investigaciones han arrojado dudas sobre el hecho de que la conjetura sea cierta. Yo descubrí un objeto simétrico con p^9 simetrías cuyo comportamiento sugiere algo muy distinto a lo que predice la conjetura de Higman. Pero no resuelve completamente el problema. Queda la posibilidad de que otros objetos simétricos con p^9 simetrías puedan compensar el extraño comportamiento que yo saqué a la luz,

y que la conjetura de Higman siga verificándose. Así que, por el momento, no sé si esta conjetura es cierta o no, y por desgracia Higman murió sin saberlo. Estoy ansioso por conocer la respuesta antes de que mi vida finita llegue a su fin, y cuestiones como ésta son las que me impulsan en mis investigaciones matemáticas.

Cuando me pierdo entre los casi infinitos vericuetos de mis pesquisas, a veces me pregunto si mi cerebro será capaz de resolver el problema sobre el que trabajo. De hecho, las matemáticas pueden usarse para probar que hay desafíos matemáticos que superan las limitaciones físicas del cerebro humano, con sus 86 mil millones de neuronas conectadas por más de 100 trillones de sinapsis.

Las matemáticas son infinitas. No se acaban nunca. Al contrario que en el ajedrez, donde se estima que habrá del orden de $10^{10^{50}}$ partidas diferentes, en las matemáticas existe una cantidad infinita de enunciados demostrables. En el ajedrez, se comen piezas, se ganan partidas y las situaciones se repiten. Las matemáticas, sin embargo, no llegan nunca al final del juego, y eso significa que aunque ponga a mis 86 mil millones de neuronas a trabajar al límite de sus posibilidades físicas, en toda mi vida solamente habré podido dar un número finito de pasos lógicos, y por lo tanto solamente podré conocer una parte finita de las matemáticas. ¿Podría ser que para llegar a una demostración de la conjetura PORC se precisasen más pasos lógicos que los que yo pueda dar en toda mi vida?

Aunque convirtiéramos al universo entero en un gran ordenador, habría límites para lo que podríamos llegar a saber. En su artículo «El poder de computación del universo», Seth Lloyd calcula que desde la Gran Explosión el universo no ha podido realizar más de 10^{120} operaciones con números con un máximo de 10^{90} dígitos. En cualquier momento dado, el universo no puede conocer más que una porción finita de las matemáticas. Uno se puede preguntar: pero ¿qué es lo que

calcula el universo? En realidad, está calculando su propia evolución dinámica. Aunque los números son enormes, siguen siendo finitos. Significa que podemos probar computacionalmente que en cualquier momento dado habrá cosas que el universo observable no conoce.

Pero resulta que las matemáticas tienen tramos más profundos sumidos en la incógnita. Aunque dispusiéramos de un ordenador con capacidad y velocidad infinitas, hay cosas que nunca sabremos. Un teorema probado en el siglo xx ha planteado la posibilidad horrenda de que ni siquiera un ordenador con ese poder infinito pueda saber nunca si la conjetura PORC es cierta o no. Se conoce como teorema de incompletitud de Gödel y sacudió el edificio de las matemáticas hasta sus mismos cimientos. Puede ser que dichas conjeturas sean ciertas, pero que estará siempre fuera de nuestro alcance probarlas en el marco axiomático de las matemáticas. Gödel demostró que, dentro de un marco axiomático dado de las matemáticas, siempre habrá enunciados matemáticamente ciertos que nunca podremos probar que lo son, razonando dentro de ese marco. Una demostración matemática de que existen cosas que no están al alcance de una demostración: matemáticas más allá de la frontera.

Cuando oí hablar de este teorema en la universidad, me produjo una tremenda impresión. A pesar de las limitaciones físicas de mi cerebro o del cerebro del universo, pienso que crecí con la creencia tranquilizadora de que, al menos teóricamente, habría una prueba en algún sitio que demostraría que la conjetura PORC es cierta o no, o que la hipótesis de Riemann es cierta o no. Uno de mis héroes matemáticos, el húngaro Paul Erdős, solía hablar con cariño de las demostraciones de «El Libro». Ahí era donde, según Erdős, Dios recogía las demostraciones más elegantes de cada teorema matemático. El desafío para el matemático es desvelar las demostraciones de El Libro. Como bromeaba Erdős en una charla que dio en 1985: «No es preciso creer en Dios, pero

es preciso creer en El Libro». Erdős mismo puso en duda la existencia de Dios, aunque lo llamaba el Fascista Supremo, por esconderle los calcetines y su pasaporte húngaro. Pero creo que la mayoría de los matemáticos aceptaron la metáfora de El Libro. Sin embargo, la demostración que conocí en el curso universitario de lógica matemática probaba que faltaban páginas en El Libro, páginas que ni siquiera tenía el Fascista Supremo.

UNIVERSOS PARALELOS

La revelación de que había afirmaciones matemáticas que están fuera del alcance de una demostración la provocó el descubrimiento de que uno de los enunciados geométricos que Euclides había usado como axioma no era de hecho tan axiomático como se había pensado.

Un axioma es una premisa o punto de partida para una línea lógica de razonamientos. En general, se supone que un axioma expresa una verdad evidente que se acepta como tal sin necesidad de demostración. Por ejemplo, yo creo que si tomo dos números, obtengo el mismo resultado al sumarlos en un orden o en el otro. Si tomo el 36 y le sumo 43, no sale distinto que si tomo el 43 y le sumo 36. Alguien podría preguntar por qué sé que esto siempre será cierto. Quizá ocurra algo raro cuando tome números realmente grandes y los sume. Las matemáticas se limitan a hacer deducciones sobre números que satisfacen esta regla. Si al contar cosas en el universo pasaran cosas raras, lo que habría que hacer sencillamente es aceptar que las matemáticas que hemos desarrollado a partir de ese axioma no son aplicables al modo físico en que los números funcionan en el universo. Desarrollaríamos entonces una nueva teoría de números basada en otros que satisficieran un conjunto fundamental de axiomas diferente.

Aunque muchos de los axiomas que usó Euclides para de-

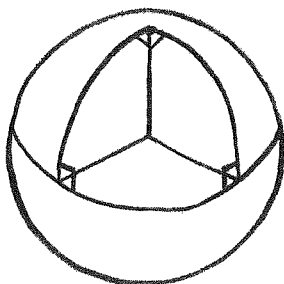
ducir su geometría parecían verdades evidentes en sí mismas sobre la geometría del universo, había una que cada vez resultó más sospechosa a ojos de los matemáticos.

El postulado de las paralelas afirma que si tenemos una recta y un punto exterior a ella, entonces hay una única recta que pasa por ese punto y que es paralela a la primera recta. Este postulado ciertamente parece obvio si se está trabajando en una hoja plana. Es uno de los axiomas que resulta crucial en la demostración de Euclides del hecho de que los ángulos de un triángulo suman 180 grados. Ciertamente, cualquier geometría en la que sea cierto el postulado de las paralelas producirá triángulos con esa propiedad. Pero el descubrimiento en el siglo XIX de nuevos tipos de geometría sin rectas paralelas, o con muchas rectas paralelas a una dada, llevó a los matemáticos al convencimiento de que la geometría de Euclides era sencillamente una entre un abanico de diferentes geometrías posibles.

Por ejemplo, si consideramos la superficie de una esfera—una geometría curva—las rectas o líneas confinadas en esta geometría no son rectas propiamente, sino que están curvadas. Si consideramos dos puntos en la superficie de la Tierra, el camino más corto entre estos dos puntos no coincide con la línea recta que uno hubiera dibujado en un atlas plano, como sabe cualquiera que haya atravesado el Atlántico. Eso sucede porque la línea que une los dos puntos es parte de una circunferencia que divide a la esfera en dos mitades perfectas, como una de las líneas de longitud. De hecho, si uno de los puntos es el Polo Norte o el Polo Sur, entonces esa línea sería una línea de longitud. Todas las rectas o líneas de esta geometría son líneas de longitud que se han desplazado a lo largo de la esfera para que pasen por los dos puntos en cuestión. Se llaman circunferencias máximas. Pero si consideramos ahora un tercer punto, que no esté en esa circunferencia máxima, no hay modo de encontrar una circunferencia máxima que pase por ese punto y que no corte a la

primera circunferencia máxima. He aquí entonces una geometría que no tiene rectas paralelas.

En consecuencia, cualquier demostración que se apoye en el postulado de las paralelas no tiene por qué ser cierta en esta nueva geometría. Pensemos por ejemplo en la demostración de que los ángulos de un triángulo suman 180 grados. Esta afirmación depende de que la geometría satisfaga el postulado de las paralelas. Pero esta geometría esférica no lo satisface. Y de hecho, contiene triángulos cuyos ángulos suman más de 180 grados. Tomemos el Polo Norte y dos puntos del Ecuador y formemos un triángulo con estos tres puntos. Como los dos ángulos que se forman en el Ecuador suman un total de 180 grados, es claro que la suma de los tres ángulos es mayor que 180 grados.



Triángulo cuyos ángulos suman
más de 180 grados.

Se descubrieron también otras geometrías en las que no había solamente una paralela, sino varias paralelas a una recta dada que pasaban por un punto determinado. En estas geometrías, llamadas hiperbólicas, la suma de los ángulos de un triángulo es inferior a 180 grados. Estos descubrimientos no invalidaron ninguna de las demostraciones de Euclides. He aquí un gran ejemplo que muestra cómo los avances matemáticos enriquecen en lugar de destruir los conocimientos previos. No obstante, la introducción de estas nuevas geome-

trías a principios del siglo XIX causó bastante conmoción. De hecho, algunos matemáticos pensaron que una geometría que no satisficiera el axioma de Euclides sobre las rectas paralelas habría de contener alguna contradicción que la haría descartable por imposible. Sin embargo, investigaciones posteriores mostraron que cualquier contradicción inherente en estas nuevas geometrías implicaría una contradicción también en el corazón mismo de la geometría euclídea.

Ese pensamiento era una herejía. La geometría de Euclides había resistido la prueba del tiempo y no había dado lugar a ninguna contradicción en dos mil años. Pero un momento... esto empieza a sonar como si estuviéramos hablando de una ciencia experimental. Sin duda las matemáticas deberían ser capaces de probar que la geometría euclídea no conducirá nunca a contradicciones. No deberíamos confiar simplemente en el hecho de que, como ha funcionado bien hasta ahora, todo está correcto. Así es como trabajan los científicos en los laboratorios que se encuentran al cruzar la calle. Nosotros los matemáticos hemos de ser capaces de demostrar que nuestra disciplina está exenta de contradicciones.

¿CÓMO SE TITULA ESTA SECCIÓN?

Cuando a finales del siglo XIX la teoría matemática de conjuntos produjo resultados extraños que conducían aparentemente a paradojas irresolubles, los matemáticos empezaron a tomarse más en serio esa necesidad de probar que nuestra disciplina está exenta de contradicciones. El filósofo británico Bertrand Russell fue el creador de unas cuantas de estas paradojas preocupantes. Desafió a la comunidad matemática con el conjunto de todos los conjuntos que no pertenecen a sí mismos como elementos. El problema era si este nuevo conjunto pertenecía o no a sí mismo como elemento. El único modo de pertenecer a este nuevo conjunto es ser un conjunto que no pertenece a sí mismo como elemento. Pero

tan pronto como ponemos un conjunto como elemento del nuevo conjunto, resulta súbitamente ser (por supuesto) un conjunto que pertenece a sí mismo como elemento. ¡Argh! No parecía haber manera de resolver esta paradoja, y sin embargo la construcción no estaba muy alejada del tipo de conjuntos sujetos a consideración por parte de los matemáticos.

Russell descubrió otros ejemplos más prosaicos y caseros de este tipo de paradojas autorreferentes. Por ejemplo, imaginó una isla en la que una ley decretaba que el barbero tenía que afeitar a todos aquellos que no se afeitaban a sí mismos, y a nadie más. El problema es que esta ley conduce a una paradoja: ¿puede el barbero afeitarse a sí mismo? No, ya que solamente se le permite afeitar a los que no se afeitan a sí mismos. Pero entonces pasa a ser alguien que ha de ser afeitado por el barbero. De nuevo: ¡argh! El barbero ha asumido el papel del conjunto que Russell trató de definir, el conjunto de todos los conjuntos que no pertenecen a sí mismos como elementos.

Creo que mi ejemplo favorito de todas estas paradojas es el enigma de describir números. Supongamos que consideramos todos los números que pueden definirse usando 21 palabras o menos del diccionario de la Real Academia Española. Por ejemplo, el 1729 puede definirse como «el número más pequeño que puede escribirse como suma de dos cubos de dos modos distintos». Como solamente hay un número finito de palabras en el diccionario de la Real Academia Española y podemos usar un máximo de 21 palabras, es imposible definir todos los números de este modo, ya que hay infinitos números y solamente un número finito de frases con 21 palabras o menos. Así que hay un número que puede definirse así: «el número más pequeño que no puede definirse con menos de veintiún palabras del diccionario de la Real Academia Española». Pero, un momento... acabo de definirlo con menos de 21 palabras. ¡Argh!

El lenguaje natural es propenso a producir enunciados

paradójicos. Juntar palabras no implica que se produzca una frase que tenga sentido o un valor de verdad. Pero el aspecto preocupante del conjunto de todos los conjuntos que no pertenecen a sí mismos como elementos de Russell es que es un objeto muy próximo al tipo de objetos que los matemáticos pueden estar interesados en definir.

Los matemáticos encontraron finalmente modos de sortear esta situación paradójica, que pasaban por refinar la idea intuitiva de conjunto, pero siguió quedando un preocupante mal sabor de boca. ¿Qué más sorpresas podían esconderse en el edificio de las matemáticas? Cuando el gran matemático alemán David Hilbert fue invitado a hablar en el Congreso Internacional de Matemáticos en 1900, decidió exponer los veintitrés problemas más destacados que estaban sin resolver y que los matemáticos tendrían que encarar en el siglo xx. El problema de probar que las matemáticas están exentas de contradicciones era el segundo de la lista.

En su conferencia, Hilbert declaró valientemente lo que para muchos era el mantra de las matemáticas: «Esta convicción en la resolubilidad de todo problema matemático es un poderoso incentivo para el investigador. Oímos la llamada perenne: “Aquí tienes el problema. Busca la solución. La puedes hallar usando el razonamiento puro, porque en matemáticas no existe el *ignorabimus*”». En matemáticas no hay nada que no podamos saber. Una afirmación realmente audaz.

Hilbert reaccionaba así frente a un movimiento, creciente a finales del siglo xix, que sostenía que había límites a la hora de considerar nuestra capacidad para comprender el universo. En 1880, el destacado fisiólogo Emil du Bois-Reymond había hablado en la Academia de Berlín señalando los que consideraba los siete enigmas de la naturaleza y que, según él, estaban fuera del alcance de nuestro conocimiento y había que recogerlos bajo el epígrafe «*ignoramus et ignorabimus*», cosas que no sabemos y que nunca sabremos.

A la luz de mi intento por comprender qué cuestiones podrían estar fuera del alcance de nuestro conocimiento, es interesante comparar mi lista con los siete enigmas presentados por Du Bois-Reymond:

1. La naturaleza última de la fuerza y la materia.
2. El origen del movimiento.
3. El origen de la vida.
4. Los ordenamientos aparentemente teleológicos de la naturaleza.
5. El origen de las sensaciones simples.
6. El origen del pensamiento inteligente y el lenguaje.
7. La cuestión del libre albedrío.

Du Bois-Reymond pensaba que 1, 2 y 5 eran verdaderamente trascendentes. Las dos primeras aún figuran en gran medida en el núcleo de las cuestiones que consideramos en las primeras «fronteras». Los ordenamientos teleológicos de la naturaleza se refieren a la cuestión de por qué el universo parece tan perfectamente ajustado para la vida, algo que todavía nos quita el sueño hoy. La idea del multiverso es nuestra respuesta mejor ante este enigma. Las tres últimas fueron el tema de la «frontera» anterior, en la que se sondearon los límites de la mente humana. Quizá solamente en el enigma del origen de la vida se haya avanzado.

Pero Hilbert no estaba dispuesto a admitir que los enunciados matemáticos entrasen en la lista de enigmas de Du Bois-Reymond. Treinta años después, el 7 de septiembre de 1930, cuando Hilbert volvió a Königsberg, su ciudad natal, para ser nombrado ciudadano honorífico, concluyó su discurso de aceptación de ese título con un claro toque a rebato para los matemáticos:

Para el matemático, no hay un *ignorabimus* y, en mi opinión, tampoco lo hay en las ciencias naturales. La verdadera razón por la que nadie ha conseguido encontrar un problema irresoluble es porque, en mi opinión, no existe ningún problema irresoluble. En

oposición al ridículo *ignorabimus*, nuestro lema debe ser *Wir müssen wissen. Wir werden wissen* [Debemos saber. Sabremos].

Sin embargo, Hilbert ignoraba el inesperado anuncio que se había hecho la vigilia de la ceremonia en un congreso que se celebraba en la misma ciudad: las matemáticas contienen *ignorabimus*. Un lógico austríaco de veinticinco años llamado Kurt Gödel había probado que era imposible probar que las matemáticas estuvieran exentas de contradicciones. Y fue incluso más allá. Dentro de cualquier marco axiomático para las matemáticas, siempre habrá enunciados sobre los números que, pese a ser ciertos, es imposible probar que lo son dentro del marco axiomático dado. El toque a rebato de Hilbert—«*Wir müssen wissen. Wir werden wissen*»—encontraría finalmente su emplazamiento adecuado: su propia lápida. Las matemáticas tendrían que afrontar la revelación de que en ellas también había enigmas que nunca se podrían resolver.

LA SIGUIENTE FRASE ES FALSA

El título de esta sección es cierto.

Gödel recurrió a enunciados autorreferentes, como el que encontré en mi *cracker* navideño, para elaborar su demostración devastadora de que las matemáticas tenían sus limitaciones.

Aunque las frases en el lenguaje natural puedan dar lugar a paradojas, en lo que respecta a enunciados sobre los números, uno espera que una proposición sea verdadera o falsa. Gödel estaba intrigado por la posibilidad de explotar la idea de autorreferencia en las proposiciones matemáticas. El desafío de Hilbert ya tenía un elemento autorreferencial inserto en él: quería construir un argumento matemáticamente seguro para probar que las matemáticas no tenían contradicciones. El reto pedía ya que las matemáticas se mirasen a

sí mismas para probar que no darían lugar a la súbita aparición de demostraciones que probaran que dos afirmaciones contradictorias eran ambas ciertas.

Gödel quería probar que, dentro de un sistema axiomático dado para la teoría de números, siempre habría proposiciones verdaderas sobre los números que no podrían probarse a partir de los axiomas. Merece la pena señalar que uno puede establecer diferentes sistemas de axiomas para tratar de captar cómo funcionan los números. La esperanza de Hilbert era que las matemáticas pudieran construir un sistema axiomático a partir del cual fuera posible probar todas las verdades matemáticas. Gödel encontró una manera de echar por tierra esta esperanza.

El ingenioso ardid que Gödel aplicó consistía en crear un código que asignara a cada proposición con sentido sobre los números su propio número de código. Una idea parecida funciona ahora que estoy tecleando. Las palabras que uso para contar la historia de Gödel se convierten en series de dígitos que representan las letras que tecleo. Por ejemplo, en ASCII decimal, «Gödel» se convierte en el número 71246100101108. El código que Gödel ideó tenía la ventaja de que permitiría a las matemáticas hablar sobre ellas mismas.

Según el código de Gödel, cualesquiera axiomas que eligiéramos para captar la teoría de números—los enunciados a partir de los cuales deducimos los teoremas de las matemáticas—tendrán cada uno su propio número de código. Por ejemplo, el axioma «si $A = C$ y $B = C$, entonces $A = B$ » tiene su propio número de código. Pero las proposiciones que se puedan deducir de esos axiomas, como «existen infinitos números primos», tendrán también su propio número de código; incluidas las proposiciones falsas, como «17 es un número par».

Estos números de código permitieron a Gödel hablar, en el lenguaje de la teoría de números, sobre el hecho de que

una proposición concreta sea o no demostrable dentro del sistema. La idea básica es diseñar el código de tal modo que una proposición es demostrable si su número de código es divisible por los números de código de los axiomas. En realidad, era mucho más complicado, pero esta simplificación nos ayudará a entender el argumento.

Gödel podía ahora expresar el hecho de que una proposición fuera o no demostrable a partir de los axiomas mediante un enunciado sobre números. Para expresar el hecho de que «La proposición “existen infinitos números primos” puede probarse a partir de los axiomas de la teoría de números» se puede decir, en traducción a números, «el número de código de la proposición “existen infinitos números primos” es divisible por los números de código de los axiomas de la teoría de números», un enunciado puramente matemático sobre los números, que es verdadero o falso.

Ahora, agárrese quien pueda, que llegamos ya a los vericuetos lógicos de la demostración de Gödel... Gödel sometió a consideración la proposición S : «Esta proposición no es demostrable». La proposición S tiene un número de código, pero si analizamos su contenido, éste se traduce en una proposición que dice simplemente que el número de código de S no es divisible por todos los números de código de los axiomas. Supongamos que el sistema axiomático para la teoría de números que estamos analizando no conduce a contradicciones, como esperaba Hilbert.

Gracias a la codificación de Gödel, S es sencillamente un enunciado sobre números. O bien el número de código de S es divisible por los números de código de los axiomas, o bien no lo es. Esto tiene que ser cierto o falso. No puede ser ambas cosas, pues eso estaría en contradicción con la suposición de que el sistema no conduce a contradicciones.

Supongamos que existiera una demostración de S a partir de los axiomas de la teoría de números. Esto implicaría que el número de código de S es divisible por los números de có-

digo de los axiomas. Pero una proposición demostrable es una proposición cierta. Si analizáramos ahora el significado de S , éste afirmaría que el número de código de S no es divisible por todos los números de código de los axiomas. Una contradicción. Pero estábamos suponiendo que las matemáticas no tienen contradicciones. Al contrario de lo que ocurría con la paradoja de mi *cracker* navideño, tiene que haber una salida para este rompecabezas lógico.

La manera de resolver esto es aceptar que nuestra suposición original era falsa: no podemos probar que S sea cierta a partir de los axiomas de la teoría de números. Pero esto es exactamente lo que dice S . Así que S es cierta. Hemos conseguido probar que la proposición S de Gödel es cierta, pero que no puede probarse que lo es a partir de los axiomas.

Esta demostración puede recordar el método que se utilizó para probar que la raíz cuadrada de 2 era irracional. Primero suponemos que no lo es. Esto conduce a una contradicción. Así que la raíz de 2 tiene que ser irracional irremediablemente. Las demostraciones de ambos resultados se basan en la importante suposición de que los axiomas de la teoría de números no conducen a contradicciones. Una de las consecuencias más llamativas de la demostración de Gödel es que no hay manera de salvar a las matemáticas añadiendo como axioma adicional una de estas proposiciones indemostrables. Podría uno pensar que, si la proposición S es cierta pero indemostrable, ¿por qué no convertirla en un axioma, y así a lo mejor resulta que ya todas las proposiciones ciertas son demostrables? La demostración de Gödel muestra por qué esto no funcionaría: por muchos axiomas que se añadan al sistema original, siempre habrá proposiciones verdaderas que no son demostrables.

Que el lector no se inquiete si en estos momentos la cabeza le da vueltas, como consecuencia del baile lógico al que nos ha llevado Gödel. A pesar de haber estudiado el teorema muchas veces, siempre me quedo un poco aturdido al terminar la de-

mostración: sus consecuencias son chocantes. Gödel probó matemáticamente que dentro de cualquier sistema axiomático de la teoría de números que estuviera exento de contradicciones existían proposiciones verdaderas sobre los números que no podían ser probadas dentro de ese sistema; una prueba matemática de que las matemáticas tienen sus limitaciones. Lo más intrigante es que no se trata de que la proposición S sea incognoscible. De hecho, se ha probado que es cierta. Lo único que pasa es que hemos tenido que trabajar fuera del sistema axiomático para las matemáticas concreto que, como hemos demostrado, tiene sus límites. Lo que probó Gödel es que no puede ser demostrada dentro de ese sistema.

Gödel usó esta revelación, ya de por sí devastadora, conocida como el primer teorema de incompletitud de Gödel, para aniquilar las esperanzas que Hilbert tenía puestas en una demostración de que las matemáticas estaban exentas de contradicciones. Gödel probó que «esta proposición no es demostrable» es una proposición cierta bajo la hipótesis de que las matemáticas no tienen contradicciones. Si se pudiera probar matemáticamente que no hay contradicciones, esto podría usarse para demostrar dentro de las matemáticas que la proposición «esta proposición no es demostrable» es cierta. Pero esto es una contradicción, porque dice que no es demostrable. Así que cualquier hipotética demostración de que las matemáticas están exentas de contradicciones conduciría inevitablemente a una contradicción. Estamos de nuevo metidos de lleno en enunciados autorreferentes. La única manera de resolver la situación era aceptar que no podemos demostrar matemáticamente que las matemáticas estén exentas de contradicciones. Esto es lo que se conoce como segundo teorema de incompletitud de Gödel. Para horror de Hilbert, revelaba que había un *ignorabimus* incrustado en el corazón de las matemáticas.

No obstante, los matemáticos sí creen que las matemáticas están libres de contradicciones. Si hubiera contradiccio-

nes, ¿cómo hubiéramos podido llegar tan lejos sin que se derrumbara el edificio? Decimos que una teoría es consistente cuando está exenta de contradicciones. El matemático francés André Weil resumió muy bien las consecuencias devastadoras del trabajo de Gödel: «Dios existe porque las matemáticas son consistentes, y el Diablo existe porque no podemos demostrarlo».

¿Significan las revelaciones de Gödel que las matemáticas están tan sujetas a revisión como cualquier otra teoría científica? Podríamos haber dado con el modelo correcto, pero igual que un modelo del universo o de las partículas elementales, nos es imposible saber si un día caerá hecho añicos bajo el peso de nuevas verdades.

Para algunos filósofos, hay algo bastante atractivo en el hecho de que, aunque no podamos probar que la proposición *S* de Gödel es cierta dentro del sistema axiomático de la teoría de números, al menos hemos probado que es cierta trabajando fuera del sistema. Esto parecía implicar que el cerebro humano era algo más que una máquina calculadora preparada para analizar matemáticamente el mundo. En un artículo titulado «Mentes, máquinas y Gödel», presentado ante la Sociedad Filosófica de Oxford en 1959, el filósofo John Lucas propuso el argumento de que si modeláramos la mente como una máquina que sigue ciertos axiomas y las reglas deductivas de la aritmética, entonces, al ir construyendo demostraciones en serie, en algún momento se encontraría con la frase «Esta proposición no es demostrable» y se pasaría el resto del tiempo intentando probar si es verdadera o falsa; y sin embargo nosotros, como humanos, al comprender su significado podríamos ver que es indecidible. «Así que la máquina no sería aún un modelo adecuado de la mente [...] que puede desenvolverse mejor que cualquier sistema formal, osificado y muerto», afirma Lucas.

Parece un argumento muy atractivo. ¿A quién no le gustaría creer que los humanos somos algo más que un dispositivo

computacional, algo más que un simple programa instalado en un ordenador biológico? En sus recientes investigaciones sobre la conciencia, Roger Penrose ha utilizado el argumento de Lucas como plataforma para su creencia de que precisamos el desarrollo de una nueva física con el fin de comprender qué hace consciente a la mente humana. Pero, aunque es cierto que reconocemos la verdad de la proposición «Esta proposición no es demostrable» trabajando fuera del sistema, ello es así también gracias a una suposición muy fuerte, que consiste en asumir que el sistema dentro del cual estamos trabajando para probar la verdad de la proposición de Gödel se halla él mismo exento de contradicciones. Y éste es el contenido del segundo teorema de incompletitud de Gödel: no podemos probarlo.

El tipo de proposición, verdadera pero indemostrable, que Gödel elaboró puede parecer un poco esotérica desde un punto de vista matemático. Sin duda, las proposiciones realmente interesantes sobre los números, como la hipótesis de Riemann, la conjetura de Goldbach o la conjetura PORC, no serán indemostrables, ¿verdad? El caso es que la esperanza de que las proposiciones tortuosas tipo Gödel fueran las únicas que están fuera del alcance de una demostración resultó ilusoria. En 1977, los matemáticos Jeff Paris y Leo Harrington encontraron una proposición genuina sobre los números que, según demostraron, era verdadera pero indemostrable dentro del marco axiomático clásico de la teoría de números. Pero en el siguiente capítulo descubriremos que los matemáticos, en su lidia con la idea del infinito, descubrieron no sólo que algunas proposiciones son indemostrables, sino también que es imposible decir si son verdaderas o falsas.

UN CHISTE

Después de haber leído este capítulo y la tercera «frontera», el lector está preparado para otro de los chistes de mis

crackers navideños paradójicos. La único que necesita saber es que el lingüista y filósofo estadounidense Noam Chomsky distinguía entre competencia lingüística (el conocimiento lingüístico que una cultura posee) y desempeño lingüístico (la manera de usar el lenguaje a la hora de comunicarse). El chiste dice así:

Heisenberg, Gödel y Chomsky entran en un bar. Heisenberg echa un vistazo al local y dice:

—Como somos tres y esto es un bar, tiene que ser un chiste. La cuestión es si es gracioso o no.

Tras reflexionar un momento, Gödel responde:

—Bueno, como estamos dentro del chiste, no podemos decir si es gracioso o no. Tendríamos que estar fuera de él para poder juzgarlo.

Chomsky les mira a ambos y dice:

—Claro que es gracioso. Lo que pasa es que lo contáis muy mal.

El silencio eterno de esos espacios infinitos me aterra.

BLAISE PASCAL, *Pensamientos*

Como descubrimos en la cuarta «frontera», en el universo físico que habitamos existen límites más allá de los cuales no podemos ver qué hay. Sin embargo, yo no invierto mi tiempo en explorar el universo físico, sino un universo mental de verdades matemáticas. No necesito telescopios, cohetes ni microscopios. Dispongo de diversas herramientas para sondear los límites de este mundo. Para empezar, la cuestión de si es o no infinito puede resolverse con el equipo finito que tengo en la cabeza. Las matemáticas nos proporcionan métodos para salvar las barreras que nos impiden explorar los confines del universo físico. No hay un número que sea más grande que todos los demás. Siempre podemos sumar 1 ante cualquier intento de acotar el universo de los números. Y con este sencillo acto de sumar 1, tenemos un método para construir mentalmente mundos infinitos.

Pero ¿qué podemos saber sobre estos mundos infinitos? ¿Hay límites en mis herramientas neurológicas finitas a la hora de recorrer este universo infinito de números, de modo que es imposible avanzar a partir de cierto punto? Hasta el siglo XIX *infinito* era sinónimo de «fuera del alcance del conocimiento». Y sin embargo, desde que los antiguos griegos inventaron las artes ocultas de las matemáticas, los humanos hemos usado nuestras mentes finitas para explorar el infinito.

He aquí otro de los chistes matemáticos que salió en uno de los *crackers* navideños:

PROFESOR: ¿Cuál es el número más grande?

ESTUDIANTE: Setenta y tres millones doce.

PROFESOR: ¿Y qué me dices del setenta y tres millones trece?

ESTUDIANTE: Vale. ¡Pero he fallado por poco!

Los antiguos griegos comprendieron que los números no tenían límite, pero esto era distinto que saber que el infinito existía verdaderamente. Aristóteles distinguió entre infinito potencial e infinito actual. Existe la posibilidad de seguir sumando siempre 1 a un número, pero concebir una infinidad de números es imposible. No obstante, resulta llamativa la habilidad que desarrollaron los griegos para manejar argumentos lógicos finitos con el propósito de explorar ese infinito potencial.

Por ejemplo, una de las primeras grandes demostraciones de las matemáticas que se encuentran en los *Elementos* de Euclides es la aclaración de que en el universo de todos los números hay un número infinito de números indivisibles, a los que llamamos números primos. Pensar en la demostración euclidiana aún hace que me estremezca de emoción: la idea de que algo que visto desde fuera parece infinito e intratable puede, sin embargo, ser comprendido.

Uno podría preguntarse: si hemos admitido la posibilidad de que los números son ilimitados, ¿por qué el hecho de probar que hay infinitos números primos habría de ser tan extraordinario? Al fin y al cabo, saber que hay infinitos números pares no es tan sorprendente una vez que hemos admitido que los números no terminan nunca. Lo que hace que esa demostración sea tan sorprendente es el hecho de que no comprendemos verdaderamente la naturaleza de los números primos. Muestra que el conjunto de números primos es infinito sin

necesidad de precisar dónde están. La cuestión de si el universo físico es infinito podría precisar un enfoque parecido: un argumento lógico que implique que el espacio debe seguir existiendo indefinidamente sin necesidad de que lo veamos.

A pesar de los éxitos de los antiguos griegos, el infinito ha causado problemas durante milenios. La mayoría lo ha considerado como expresión de lo que está fuera del alcance de nuestra comprensión. Santo Tomás de Aquino, el teólogo y filósofo cristiano del siglo XIII, escribió:

La existencia efectiva de un conjunto infinito es imposible. Pues cualquier conjunto de cosas que uno considere ha de ser un conjunto concreto. Y los conjuntos de cosas tienen un número concreto de entes en ellos. Ningún número es infinito, pues los números salen de contar un conjunto de unidades. Así que ningún conjunto puede ser de hecho ilimitado.

Las discusiones sobre el infinito no se alejaron nunca mucho de las teológicas. En el siglo V, el filósofo cristiano san Agustín escribió en su obra más famosa, *La ciudad de Dios*, que el infinito estaba reservado a Dios. Mostró desdén hacia todos aquellos que pensaban que el infinito estaba incluso fuera del alcance de la mente de Dios:

Y que sea posible que Dios todopoderoso no sepa los números por su infinidad y que la ciencia de Dios llegue hasta cierta suma de números, y que ignore los demás ¿quién habrá que pueda decirlo, por más ignorante y necio que sea? [...] ¿qué presunción es la nuestra, que siendo unos hombrecillos nos atrevemos a poner límites a su ciencia?

El filósofo medieval Oresme, que consideró la idea de que podría haber un espacio infinito más allá de la esfera celeste que contenía nuestro universo, también era un experto en manipular infinitos matemáticos. Fue el primero en probar

el hecho llamativo de que si seguimos sumando las fracciones $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots$ la respuesta puede ser tan grande como queramos. Fue también uno de los primeros en considerar la idea de que podríamos ser capaces de comparar el tamaño de distintos infinitos. Al fin y al cabo, se puede por ejemplo comparar el infinito de todos los números con el infinito de los números pares, emparejando cada número con el doble del mismo. Pero Oresme, dado que hay claramente menos números pares que números a secas, concluyó que comparar infinitos era una jugada arriesgada.

Durante siglos muchos pensaron que los argumentos de este estilo probaban que en verdad el infinito no podía existir. El clérigo y matemático Thomas Bradwardine, que vivió en Inglaterra en el siglo XIV, utilizó una idea parecida para probar que el mundo no era eterno. Si el mundo fuera eterno, argumentó, el número de almas femeninas y el número de todas las almas serían ambos infinitos. Al ser ambos conjuntos infinitos, se podrían emparejar. Pero entonces no quedaría sitio para las almas masculinas. De modo que un número infinito de almas conducía a una contradicción.

Algunos siglos después, el infinito sigue confundiendo y enredando a los matemáticos. Galileo tuvo problemas parecidos a los de Oresme y Bradwardine al considerar el total de números cuadrados. Por un lado, hay claramente más números que no son cuadrados que números que lo son, o sea, que pueden escribirse como un cuadrado. Los números cuadrados 1, 4, 9, 16, 25... están cada vez más dispersos, siempre caben más números no cuadrados entre cada dos cuadrados sucesivos. Pero ¿no es cierto también que todo número es la raíz cuadrada de un cuadrado? Desde esta perspectiva, todo número puede ser emparejado con un cuadrado, lo que nos lleva a la conclusión de que hay el mismo número de cuadrados que de números.

Igual que a Oresme antes que a él, a Galileo esto lo dejó desconcertado. Como escribió en *Las dos nuevas ciencias*:

Las dificultades en el estudio del infinito surgen porque tratamos, con nuestras mentes finitas, de discutir el infinito, asignándole aquellas propiedades que damos a lo finito y limitado; pero esto [...] es erróneo, porque no podemos decir que una cantidad infinita es mayor, menor o igual a otra.

El símbolo, hoy familiar, con que se representa el infinito, se introdujo poco después de la muerte de Galileo. El símbolo ∞ fue usado por primera vez por el matemático inglés John Wallis en 1655. Lo eligió para captar la idea de que uno podía recorrer la curva infinitas veces.

Durante otros dos siglos, los matemáticos estuvieron a gusto con la idea de un infinito potencial, pero no con la idea de que el infinito existía verdaderamente; pensar en eso parecía acarrear demasiados problemas. Como decía el matemático del siglo XIX Carl Friedrich Gauss en una carta a su colega Heinrich Christian Schumacher: «Protesto contra el uso del infinito como algo completo, lo cual nunca es permisible en las matemáticas. El infinito es solamente un modo de hablar».

EL INFINITO DOMESTICADO

Entonces, a finales del siglo XIX, se produjo un viraje intelectual. Gracias al cerebro finito de un hombre, el infinito pareció estar a nuestro alcance. Para Georg Cantor, el infinito no era meramente un modo de hablar. Era un objeto matemático tangible:

El miedo al infinito es una forma de miopía que destruye la posibilidad de ver el infinito actual, siendo así que él es el que, en su forma superior, nos ha creado y nos sustenta, y en sus formas secundarias transfinitas aparece a nuestro lado por todas partes e incluso habita en nuestras mentes.

Se podría esperar que, a finales del siglo XIX, hubiera ya una frontera nítida entre las personas que abogaban por la ciencia y las que abogaban por la religión. Y sin embargo, Georg Cantor abogaba por ambas, y escribió que la religión había influido en sus ideas matemáticas. En la misma línea que Giordano Bruno, que consideraba un universo infinito, la creencia de Cantor en Dios es la hipótesis de la que deduce que el infinito existe:

Una demostración está basada en la existencia de Dios. Primero, de la perfección suprema de Dios, inferimos la posibilidad de la creación del transfinito, y después, de su gracia y esplendor, inferimos la necesidad de que la creación del transfinito en verdad se haya producido.

La propuesta de Cantor para abordar el infinito proviene de algunas de las ideas consideradas por Oresme. Decir que dos conjuntos de cosas tienen el mismo tamaño es encontrar algún modo de emparejar los elementos de uno de los conjuntos con los elementos del otro, de modo que cada elemento tenga su pareja en el conjunto contrario.

El enfoque que Cantor aplicó al infinito se basaba en pensar en los matemáticos como en una tribu que tenía nombres para los números 1, 2, 3, mientras que el resto de números recibía el nombre de «muchos», la versión de la tribu para el infinito. Si se encuentran dos tribus que no saben nombrar los números a partir del 3, pueden no obstante comparar sus tamaños y juzgar cuál de las tribus es más numerosa. Se emparejan los miembros de la primera tribu con los miembros de la segunda, y la tribu que se quede con miembros sin emparejar tiene un «muchos» más numeroso. Si las tribus pueden emparejarse exactamente, entonces sus «muchos» son del mismo tamaño.

Ésta es una buena descripción de las matemáticas del mundo animal: los animales probablemente no tienen nom-

bres para los números, pero pueden juzgar, entre dos grupos, cuál es el más numeroso. El desarrollo de cierto sentido del tamaño es básico para su supervivencia. Si un grupo de animales se encuentra con otro, necesitan evaluar rápidamente si el suyo es más grande o más pequeño que el grupo al que se enfrentan. Si es más grande, para luchar, y si es más pequeño, para huir. No necesitan que sus números tengan nombres para hacer esa comparación. Por el proceso de emparejar los miembros de un grupo con los del otro, saben que si uno de los dos se queda con miembros sin emparejar, es mayor.

Usando la idea de emparejar objetos, Cantor fue capaz de proponer un método para determinar si dos conjuntos infinitos eran idénticos en número o no. Por ejemplo, uno puede sentirse tentado de afirmar que el número de números pares es la mitad del número de todos los números. Sin embargo, Cantor mostró, exactamente como Oresme había sugerido, que hay un método de emparejar ambos conjuntos de números de modo que cada número tenga su pareja. Por ejemplo, el 1 va emparejado con el 2, el 2 con el 4, el 3 con el 6, y n con $2n$. Así que estos conjuntos tienen el mismo tamaño. La tribu que llega con los números pares en sus dorsales podrá hacer frente a la tribu que lleva en sus dorsales todos los números. Ambos conjuntos infinitos tienen idéntico tamaño.

Este argumento es similar a los que propusieron Oresme y Galileo, pero ambos se sintieron turbados por el hecho de que, desde otro punto de vista, los números pares o los números cuadrados son un subconjunto de todos los números, con lo que en cierto sentido deberían ser conjuntos más pequeños. Cantor pensó que hallar un modo de emparejar los elementos de dos conjuntos resultaba suficiente para estimar que eran de igual tamaño. Para conjuntos finitos, si se intenta emparejarlos y no se puede, ninguna reordenación de los mismos podrá producir un método de emparejarlos perfectamente. Pero en el caso infinito, Cantor vio que el reordenamiento de un conjunto puede ayudar a encontrar un nue-

vo camino para emparejar dos conjuntos de modo que ni sobre ni falte nada.

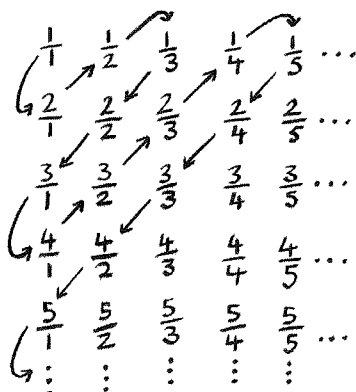
La clave para Cantor es que si hay un modo posible de emparejar ambos conjuntos sin que quede nada fuera, entonces puede decirse que ambos tienen el mismo tamaño. Es posible que haya también emparejamientos que dejen a miembros de la tribu sin pareja: por ejemplo, si emparejamos los números pares de un conjunto con los números pares del otro, quedan los infinitos números impares sin pareja. Pero para Cantor un conjunto era más grande que otro solamente en el caso en el que no hubiera ningún modo de emparejarlos sin dejar algún miembro fuera.

Por ejemplo, ¿qué pasa con un conjunto de números como las fracciones? ¿Qué tamaño tiene este infinito? Cantor descubrió un método ingenioso para comparar los números enteros con las fracciones y probar que ambos conjuntos son de idéntico tamaño. A primera vista, esto parece imposible: entre cada dos números enteros consecutivos hay infinitos números fraccionarios. Pero hay un método para emparejar todos los números enteros perfectamente con todas las fracciones de modo que no quede ninguna fracción desemparejada.

Se empieza colocando todas las fracciones en una tabla. La tabla tiene infinitas filas e infinitas columnas. La columna número n consiste en la lista de todas las fracciones $1/n$, $2/n$, $3/n$...

¿Cómo emparejó Cantor los números enteros con las fracciones por medio de esta tabla? La idea es señalar primero un camino serpenteante que recorre las fracciones diagonalmente a lo largo de la tabla, como muestra la figura. Entonces, para emparejar los números enteros con todas las fracciones, lo que hacemos es recorrer ese camino y emparejar el 1 con $\frac{1}{1}$, el 2 con $\frac{2}{1}$, el 3 con $\frac{1}{2}$, el 4 con $\frac{1}{3}$. El número 9, por ejemplo, queda emparejado con $\frac{2}{3}$, la novena fracción que encontramos cuando la serpiente se desliza por la tabla de

las fracciones. Como la serpiente cubre toda la tabla, cada fracción acabará emparejada con algún número entero.



Es un argumento bonito y sorprendente. Si me abandonaran en una isla desierta y solamente me dejaran llevar ocho teoremas, éste de la serpiente de Cantor sería uno de ellos. Es realmente fantástico encontrar un modo de emparejar todas las fracciones con los números enteros y probar así que tienen el mismo orden de magnitud.

EL INFINITO INCONTABLE

Esto empieza a parecer un poco como si todos los conjuntos infinitos tuvieran un tamaño idéntico. Quizá si una tribu tiene infinitos miembros nunca podrá ser derrotada por otra tribu. Llega ahora una tribu de primera, cuyos miembros van numerados con los desarrollos decimales de todos los posibles números. ¿Podrá la tribu cuyos miembros van numerados con los números enteros 1, 2, 3... emparejarse con esta nueva tribu? Podríamos empezar a emparejar el miembro número 1 de la primera tribu con el miembro número $\pi = 3,1415926\dots$ de la segunda tribu, después el miembro número 2 con el miembro número $e = 2,7182818\dots$ Pero

¿cómo encontrar un método para recorrer todos los miembros de la tribu de los números decimales? ¿Hay algún método ingenioso de distribuir los números con infinitos decimales de modo que los números enteros puedan serpentear entre ellos, como hizo Cantor con las fracciones?

Cantor elaboró un argumento inteligente para mostrar por qué podemos estar seguros de que, por mucho que lo intentemos, nunca podremos emparejar a los miembros de la tribu de los números enteros con la de los números decimales, ya que siempre quedará sin pareja algún miembro de esta segunda tribu. El infinito de los números dados por los desarrollos decimales infinitos es un tipo de infinito realmente más grande que el infinito de los números enteros. Es otro argumento bonito y sencillo, y creo que sería otro de los teoremas matemáticos que me llevaría a una isla desierta.

¿Cómo pudo Cantor asegurar que siempre sería posible garantizar que un miembro de la tribu de los números decimales se quedaría sin pareja? Consideremos uno de mis intentos de emparejar a los miembros de la tribu de los números enteros con los de la tribu de los números decimales:

$$\begin{aligned} 1 &\leftrightarrow 3,1415926\dots \\ 2 &\leftrightarrow 2,7182818\dots \\ 3 &\leftrightarrow 1,4142135\dots \\ 4 &\leftrightarrow 1,6180339\dots \\ 5 &\leftrightarrow 0,3331779\dots \end{aligned}$$

...

Lo que hace Cantor es construir un número con un desarrollo decimal infinito del que puede decirse con seguridad que no aparece en mi lista y que, por lo tanto, carece de pareja en el conjunto de los números enteros. Cada decimal es un dígito entre 0 y 9. Como primer dígito decimal, Cantor escoge un número que sea diferente del primer dígito decimal del número emparejado con el 1. Como segundo dígito decimal, Can-

tor escoge un número que sea diferente del segundo dígito decimal del número emparejado con el 2. Y así sucesivamente.

$$1 \leftrightarrow 3,1415926\dots$$

$$2 \leftrightarrow 2,7182818\dots$$

$$3 \leftrightarrow 1,4142135\dots$$

$$4 \leftrightarrow 1,6180339\dots$$

$$5 \leftrightarrow 0,3331779\dots$$

...

Por ejemplo, el número decimal infinito que empieza por 0,22518... no está emparejado con ninguno de los cinco primeros números enteros, ya que es diferente de los cinco primeros números decimales de la lista. De esta manera, Cantor puede señalar a un miembro de la tribu de los números decimales que no ha sido emparejado con ningún número entero. Si dijéramos, por ejemplo, que ha sido emparejado con el miembro número 101, por decir uno, Cantor podría simplemente replicar: «Comprueben el dígito que ocupa el puesto decimal número 101 del número de la lista y verán que es diferente del dígito que ocupa el puesto decimal número 101 de este nuevo número».

Existen algunos detalles técnicos que hay que vigilar. Por ejemplo, no queremos que esté en la lista el número 0,9999... porque, como sugería el chiste de «¿cuántos matemáticos se necesitan para cambiar una bombilla?», este número es de hecho igual a 1,0000... Pero la esencia del argumento es suficiente para probar que hay más números con desarrollos decimales infinitos que números enteros.

Uno podría objetar y aducir que podríamos añadir ese nuevo número a la lista, simplemente desplazando todos los demás un puesto. Pero, por muchos números que añadamos a la lista, Cantor siempre podrá repetir la jugada y construir un número decimal infinito que hemos olvidado. La clave es que el argumento funciona para cualquier intento que hagamos de emparejar los números enteros con los números de-

cimales infinitos: siempre habrá números decimales excluidos. Esta demostración recuerda la afirmación de Gödel de que por muchos axiomas verdaderos aunque indemostrables que añadamos con la esperanza de que todas las proposiciones verdaderas sean demostrables, siempre seguirá habiendo verdades carentes de demostración. De hecho, Gödel utilizó un argumento semejante al de Cantor para probar su teorema de incompletitud.

El mismo Cantor estaba sinceramente sorprendido por sus descubrimientos sobre el infinito. «Lo veo pero no lo creo», dijo.

Dado que existía más de un tipo de infinito, el símbolo ∞ introducido por Wallis ya no servía en este contexto. De hecho, las ideas de Cantor demostraron que había infinitos tipos de infinito. Cantor probó que podíamos reemplazar «muchos» por nombres significativos para todos estos infinitos. Introdujo nuevos símbolos para estos nuevos números infinitos usando letras del alfabeto hebreo. El infinito más pequeño, $\aleph_0$, se llamó alef cero, según la primera letra del alfabeto hebreo. Cantor era probablemente consciente de su significado en la Cábala, en la que representa la infinitud de Dios. No obstante, para Cantor la elección apunta también a la idea de un nuevo comienzo, el amanecer de unas nuevas matemáticas. Para mí, éste es uno de los momentos más fascinantes de la historia de las matemáticas. Es como el momento en el que se empezó a contar por primera vez. Pero en vez de 1, 2, 3, estábamos contando infinitos.

El gran matemático alemán David Hilbert reconoció que Cantor estaba creando unas matemáticas auténticamente nuevas. Hilbert afirmó que las ideas de Cantor sobre el infinito eran «el producto más asombroso del pensamiento matemático, uno de los más bellos logros de la actividad humana en el dominio de lo puramente inteligible [...] nadie nos podrá expulsar del paraíso que Cantor ha creado para nosotros». Creo que estoy de acuerdo con esto.

Cantor creyó que estaba de hecho accediendo a la mente de Dios. Pensaba que él era un portavoz de Dios, más que de sus propias matemáticas. Puede ser que su fe en algo trascendente le dio el coraje suficiente para creer que el infinito también existía. Pero fue la brillantez matemática de Cantor la que arrebató al infinito del dominio de lo desconocido y lo trasladó al terreno de lo conocido. Y la Iglesia, lejos de sentirse perturbada por los intentos de Cantor por leer la mente infinita de Dios, se interesó activamente en las nuevas ideas. Cantor se embarcó en una copiosa correspondencia con miembros de la Iglesia sobre la naturaleza de Dios y del infinito.

Sin embargo, no todo el mundo estaba tan enamorado de sus ideas. En particular, uno de los matemáticos más influyentes de Alemania, Leopold Kronecker, pensó que las matemáticas de Cantor eran una aberración, y las tachó de corruptoras de la juventud: «No sé qué predomina en la teoría de Cantor, si filosofía o teología, pero estoy seguro de que en ella no hay nada de matemáticas».

Kronecker dijo en una ocasión una frase que se hizo famosa: «Dios creó los números enteros. El resto es obra del hombre». Pero lo que Cantor había creado era tan revolucionario que Kronecker lo consideró algo así como un engendro matemático. La oposición de Kronecker al infinito de Cantor hizo que este último nunca solicitara un puesto en alguna de las grandes universidades, incluida la de Berlín, donde trabajaba Kronecker. Por ello pasó sus días en el remanso de la universidad de Halle. Cantor trató de defenderse, escribiendo al ministro de Educación sobre la actitud de Kronecker. Pero probablemente no fue una buena idea enojar a uno de los miembros claves de la comunidad matemática.

Incluso publicar sus ideas resultó dificultoso. Otro matemático influyente de aquellos días, Gösta Mittag-Leffler, descartó finalmente los trabajos de Cantor, juzgando que se adelantaban un siglo a su tiempo. Cantor se sintió gravemente

rechazado por este veredicto proveniente de un matemático al que respetaba mucho. La batalla continua contra el orden establecido, su lucha contra los misterios del infinito, y las muertes de su madre, de su hermano y del menor de sus hijos, le pasaron factura. Cantor sufrió trastorno bipolar, y las controversias sobre sus ideas matemáticas hicieron empeorar su enfermedad. Lo admitieron en la Nervenlinik de Halle, donde pasó mucho tiempo en las últimas décadas de su vida. Desilusionado de las matemáticas, volvió a la religión, y también invirtió mucho tiempo tratando de probar que Francis Bacon fue el auténtico autor de las obras de Shakespeare.

Sin embargo, la profecía de Mittag-Leffler se hizo realidad en algunos aspectos. Cien años más tarde, las ideas de Cantor son consideradas como unas de las más bonitas y extraordinarias de los últimos trescientos años. Cantor ha permitido a los matemáticos tocar el infinito, jugar con él, calcular con él, reconocer por fin que es un número. No sólo un número, sino infinitos números.

Pero para Cantor el infinito no era solamente una idea de la mente:

Defiendo tan firmemente el infinito actual que, lejos de admitir que la Naturaleza lo aborrece, como se dice normalmente, yo sostengo que la Naturaleza hace uso frecuente de él por doquier, con el fin de exhibir más eficazmente las perfecciones de su Autor. De modo que no creo que haya porción alguna de materia que no sea, no digo ya sólo divisible, sino efectivamente divisible; y en consecuencia, la partícula más pequeña habría de ser considerada como un mundo lleno de infinidad de distintas criaturas.

AHORA LO VEO, AHORA NO LO VEO

El descubrimiento de Cantor de estos peldaños de infinitud condujo a un problema muy real que no podría resolverse dentro de los axiomas usuales de las matemáticas: una pro-

posición sin demostración, indecidible, más allá de lo que podemos saber. Era una cuestión que iba directa al núcleo de lo que es el número y que revelaba justamente lo sutiles que son los números.

Cantor quería saber si hay conjuntos de números que son mayores en tamaño que los números enteros pero no tanto que puedan emparejarse con los números dados por desarrollos decimales infinitos. En otras palabras, ¿puede haber una tribu numerada con un conjunto de números de tal modo que venza a la tribu de los números enteros pero que sea vencida a su vez por la tribu de los números dados por desarrollos decimales infinitos? El nombre dado al infinito de todos los números dados por desarrollos decimales infinitos era la potencia del continuo o simplemente el continuo. La hipótesis del continuo postulaba que no había ningún infinito más pequeño que el continuo pero más grande que el infinito de los números enteros.

Hilbert quedó tan impresionado por el desafío de probar la hipótesis del continuo que situó el problema de determinar si había o no un infinito intermedio en cabeza de su lista de los 23 problemas para los matemáticos del siglo xx.

Fue una cuestión contra la que Cantor estuvo luchando el resto de su vida. Un día se convenció de que había probado que no había ningún infinito entre estos dos. Pero encontró un error. Al día siguiente pensó que había probado lo contrario: hay un infinito entre ellos. Como Cantor siempre creyó: «En matemáticas el arte de hacerse preguntas es más valioso que el de responderlas».

Y así resultó ser. Cantor tuvo tantos quebraderos de cabeza porque ambas respuestas eran correctas.

La solución a este dilema, que llegó por fin en la década de 1960, sacudió a la comunidad matemática hasta los cimientos. Basándose en ideas de Gödel, el lógico de Stanford Paul Cohen probó que nunca podríamos demostrar a partir de los axiomas para las matemáticas que usamos normal-

mente si existe o no un conjunto de números cuyo número estuviera estrictamente entre el número de números enteros y el número de números dados por desarrollos decimales infinitos. De hecho, exhibió dos modelos diferentes de números que satisfacían los axiomas que usamos en las matemáticas: en uno la respuesta a la cuestión de Cantor era afirmativa y en el otro, negativa.

No estoy seguro de que a Cantor le hubiera gustado esta solución. En una ocasión declaró: «La esencia de las matemáticas es su libertad». Pero ¿no era ésta demasiada libertad? Significaba que no había solamente unas matemáticas, ¡sino varias!

Algunos opinan que esta situación es parecida a la que se produjo cuando los matemáticos descubrieron que hay muchos tipos distintos de geometría además de la de Euclides. La geometría euclídea satisface el postulado de las paralelas, mientras que las nuevas geometrías esférica e hiperbólica no. Ahora comprendíamos que había diferentes modelos para los números, algunos con esos infinitos intermedios y otros sin ellos.

Dicho esto, hay que decir también que la situación resultó sumamente inquietante para muchos matemáticos. Pensábamos que conocíamos los números. Números como la raíz cuadrada de 2 o π podían ser irracionales, con desarrollos decimales infinitos, pero al menos sentíamos que podríamos ver estos números señalados en una regla. Así que en el caso de los números que creemos que conocemos, sentimos que debería haber una respuesta para la cuestión de Cantor. ¿Existe un subconjunto de números en esta regla que es estrictamente más grande que el conjunto de los números enteros pero estrictamente más pequeño que el conjunto de todos los números dados por desarrollos decimales infinitos? La mayoría de los matemáticos creen que la respuesta ha de ser sí o no, no sí y no. Y sin embargo, hay una demostración de que no podemos probar ni el sí ni el no.

Julia Robinson, colega de Cohen, escribió a éste: «Por el amor de Dios, ¡solamente hay una teoría de números! Ésa es mi religión». Curiosamente, tachó esta última frase antes de enviar la carta. Pero Cantor probablemente no hubiese tenido problemas con esta incertidumbre, porque su religión le animaba a aceptar cosas que trascendían la comprensión humana.

¿Qué otros problemas sin resolver que aparecen en los libros de matemáticas resultará que son indemostrables? Para abordar algunos de estos grandes problemas sin resolver podríamos necesitar añadir nuevos axiomas que los conviertan en demostrables. Gödel pensaba que esto podría explicar la dificultad de probar la conjetura de Riemann, el problema no resuelto más importante de las matemáticas. Puso también en duda el que los axiomas actuales fueran suficientes para afrontar muchos de los problemas de la teoría de números:

Uno se enfrenta a una serie infinita de axiomas que pueden extenderse más y más, sin que se intuya nunca el final [...] Es verdad que en las matemáticas de hoy prácticamente nunca se usan los niveles superiores de esta jerarquía [...] no es del todo improbable que este rasgo de las matemáticas de hoy en día tenga algo que ver con su incapacidad a la hora de probar algunos teoremas fundamentales como, por ejemplo, la hipótesis de Riemann.

SÍ Y NO

El teorema de incompletitud de Gödel es un microcosmos fascinante del desafío de tratar de probar qué es cierto. Dentro de cualquier sistema axiomático consistente para la teoría de números habrá cosas que son ciertas pero indemostrables. Uno podría decir: ¿por qué no trabajar entonces en el marco ampliado? Pero el resultado de Gödel asegura que este sistema más grande tendrá sus propios enunciados ciertos pero indemostrables y exigirá entonces de nuevo la ampliación del sistema. Es una regresión infinita muy conocida.

Hay resonancias con muchos de los problemas con los que hemos estado peleando. Quizá es imposible comprender el universo cuando formamos parte del sistema. Si el universo está descrito por una función de onda cuántica, ¿es preciso estar fuera del sistema para observarlo? La teoría del caos implica que no podemos comprender una parte del sistema como un problema aislado, porque un electrón en el confín opuesto del universo puede tener una influencia que impulse al sistema caótico en una dirección completamente diferente. Tenemos que estar fuera con el fin de considerar el sistema completo. El mismo problema se da a la hora de intentar comprender la conciencia. Estamos confinados en nuestras propias mentes, en nuestros propios sistemas, y somos incapaces de acceder a la conciencia de otra persona. Éste es también el motivo que algunos aducen para decir que estaremos siempre muy limitados en nuestra capacidad para abordar algo como la existencia de Dios, que trasciende el universo en el que estamos encerrados.

El otro aspecto importante de la obra de Gödel es el hecho de que no puede probarse, dentro del marco axiomático de la teoría de números, que ésta es consistente, que no contiene contradicciones. Esto puede aplicarse a la cuestión de si los métodos que empleamos para obtener conocimiento sobre el universo son efectivos. Cualquier intento por probar, por ejemplo, por qué la inducción es la estrategia correcta para estudiar los fenómenos físicos, va a tener que apoyarse en la aplicación de la inducción. Todo ello se convierte en algo muy parecido a un círculo vicioso.

En lo referente a las limitaciones del método matemático, las implicaciones que posee no son todas negativas y catastróficas. Uno puede decir que condujo al descubrimiento fascinante de que hay proposiciones sobre los números que podemos suponer que son ciertas o falsas, y en ambos casos llegar a modelos legítimos de las matemáticas; esto es, que hay muchos tipos diferentes de matemáticas. ¿Podríamos hacer

lo mismo si encontrásemos una cuestión genuinamente incognoscible sobre el universo? Si identificamos una cuestión cuya respuesta no podemos saber, tiene perfecto sentido trabajar sobre la hipótesis de que la respuesta es una u otra. La elección de la hipótesis de trabajo puede depender en parte de la probabilidad de que la respuesta sea una en vez de otra. Pero a veces las probabilidades no son relevantes y la elección puede basarse en las relaciones personales con las consecuencias que traería trabajar dentro de ese sistema.

En las matemáticas nos hemos librado de esta necesidad de escoger. Como matemático, me encanta poder moverme entre diferentes modelos matemáticos, que individualmente son consistentes, pero se contradicen entre sí. Por ejemplo, puedo investigar en matemáticas suponiendo que la hipótesis del continuo es cierta o suponiendo que es falsa. Si el modelo original es consistente, entonces ambos modelos lo son. Si hace que mis matemáticas funcionen, podría usar la hipótesis del continuo para explorar este universo matemático concreto. ¿Podríamos hacer lo mismo con otras cosas imposibles de conocer? Si Dios es por definición lo incognoscible, ¿podríamos hacer una elección que encarnara esta incógnita? Pero al hacer esto, ¿no estaríamos tratando de convertirlo en algo conocido, traicionando así el espíritu de la propia definición?

Hay que ser cuidadosos cuando elegimos las hipótesis bajo las cuales trabajar. No podemos suponer sin más que algo que no sabemos puede ser cierto o falso. Hay que probar primero que ambas posibilidades son consistentes. Por ejemplo, no sabemos si la conjetura de Riemann sobre los números primos es cierta o falsa, pero solamente una de estas dos posibilidades es consistente con la teoría de números. Si esta conjetura resultara indemostrable dentro de los axiomas actuales de la teoría de números, eso implicaría que es cierta. Si fuera falsa, sabríamos también que podría probarse que es falsa porque seríamos capaces de encontrar un contraejemplo

en una búsqueda finita sistemática. Si fuera falsa, no podríamos trabajar dentro de un modelo de números donde suponemos que es cierta, porque llegaríamos a contradicciones. Esto es lo que resulta tan chocante en el caso de la hipótesis del continuo: ella o su negación pueden incorporarse a una teoría consistente sin generar contradicciones.

Algunos han argumentado que los números que estamos tratando de captar axiomáticamente son supuestamente números con los que medimos, y que están por tanto localizados en lugares concretos sobre una regla. Así que podría haber una buena razón para aceptar la hipótesis del continuo como una descripción mejor de lo que estamos intentando modelar. De hecho, el lógico Hugh Woodin ha expuesto recientemente argumentos que defienden la idea de que los números que estamos tratando de modelar son aquellos en los que la hipótesis del continuo es falsa. Sostiene que si dichos números son un modelo de las mediciones de una regla, entonces hay razones para creer que esto implicaría que hay infinitos subconjuntos de tamaño intermedio entre el conjunto de los números enteros y el conjunto de todos los números dados por desarrollos decimales infinitos.

Esto ilustra la tensión entre las matemáticas y la física. Las matemáticas se han sentido muy a gusto durante siglos en el multiverso matemático: modelos matemáticos de los números o de la geometría diferentes y excluyentes entre sí. Pero aunque el físico se sienta a gusto con la idea del multiverso, perdura el deseo de identificar cuál de todas esas posibilidades describe el universo del que formamos parte.

Supongamos que un científico elabora una teoría lógica perfectamente consistente de cómo podría funcionar el universo, pero un buen día descubre que no es compatible con el comportamiento experimental de nuestro universo. La teoría hipotética se descarta sin más y deja de tener interés en el mundo de la ciencia. Si un biólogo escribe artículos sobre un animal hipotético que podría en teoría existir, como un uni-

cornio, pero que no vive de hecho sobre la Tierra, nadie se va a interesar en ellos, salvo que arrojaran alguna luz sobre animales que realmente existen. Por el contrario, en matemáticas esos nuevos mundos y esas nuevas criaturas son festejados y adoptados. Pasan a formar parte de un mosaico más rico de posibilidades matemáticas. Las ciencias se interesan por lo real, las matemáticas por lo posible. Las ciencias trazan un itinerario único a través de un árbol de posibles universos, las matemáticas trazan todos los viajes posibles.

Pero ¿qué hacer con una cuestión científica que no puede resolverse? En el caso de la hipótesis del continuo, no tiene sentido recurrir a consideraciones probabilísticas para escoger una u otra hipótesis. No es un caso en el que una sea «verdad» y la otra no. Pero ¿ocurre lo mismo con las cuestiones irresolubles de la física, en las cuales sí tenemos una «verdad»?

Es interesante pensar que, en el caso de la física, al considerar una cuestión que esté fuera del alcance de nuestro conocimiento, una respuesta será aun así una descripción correcta de nuestro universo, y la otra no. Pero por su propia naturaleza, si es irresoluble, no conseguiremos nuevos conocimientos sobre el universo que nos permitan decidir cuál es la descripción verdadera y cuál es la falsa. Si los consiguiéramos, es que la cuestión no era en realidad irresoluble. ¿Qué les pasa entonces a los que trabajan bajo la hipótesis falsa? ¡Nada! Como en el caso de la hipótesis del continuo, su negación también será consistente con la teoría vigente del universo. Se obtendrá una descripción diferente con teoremas y resultados diferentes. Si condujera a contradicciones, eso nos daría un medio para saber que es falsa, lo que significa que la cuestión no era realmente irresoluble.

Consideremos por ejemplo la cuestión de la infinitud del universo. Si es irresoluble, es porque el universo es infinito o porque es finito pero de un tamaño tal que sus límites siempre estarán más allá de nuestro horizonte de sucesos y por

lo tanto fuera del dominio de nuestras investigaciones. Si es infinito, ¿qué pasa si se trabaja bajo la hipótesis de que es finito pero tan grande que nunca podremos probar que lo es? Lo interesante es que, si esto diera problemas—si contradijera la teoría vigente o nuevos datos—, tendríamos un modo de probar que el universo es infinito, de modo que ésta no era realmente una cuestión irresoluble. Por supuesto, en matemáticas éste es un método fantástico para probar ideas sobre el infinito. Probamos que la raíz cuadrada de 2 no puede ser expresada por un cociente de dos números finitos considerando la hipótesis de que esto fuera posible y viendo que llevaba a una contradicción. Es posible que un universo infinito sea la única suposición que no conduzca a contradicciones. Podría ser que las matemáticas fueran de nuevo nuestro mejor medio para explorar los confines lejanos del universo.

En esta «frontera» hemos explorado cómo las matemáticas se las han arreglado incluso para ayudarnos a manejar el infinito mismo. Es muy llamativo que el infinito fuera considerado en su momento como algo que está fuera del alcance de nuestro conocimiento y vinculado muchas veces a la idea de Dios. Descartes escribió: «Dios es la única cosa que concibo positivamente como infinita». Y sin embargo, las ideas extraordinarias de Cantor, concebidas a finales del siglo XIX, nos proporcionan un método para explorar y comparar infinitos. El infinito no está ya fuera de nuestro alcance. Cantor no fue insensible a las implicaciones que su estudio del infinito tenía en la cuestión de Dios. De hecho, pensó que había sido elegido por Dios para revelar al mundo estas ideas sobre el infinito.

El infinito ha desempeñado un papel clave en la exploración de la existencia de Dios. Por ejemplo, la prueba de la existencia de Dios de santo Tomás de Aquino, conocida como el argumento cosmológico, propone que todo lo creado exige un creador, pero esto entonces se aplicaría al propio creador. Para evitar una regresión infinita, Dios es la solución al

problema de la causa primera. No obstante, las matemáticas nos permiten seguir construyendo nuevos infinitos considerando los viejos y tomando su unión, de modo que no hay necesidad de detener la cadena de creadores, como pensaba santo Tomás. Cada vez obtenemos algo nuevo, y el proceso nunca termina.

Aunque las matemáticas estén ahí para seguir construyendo nuevos infinitos a partir de los viejos, se hace muy difícil, incluso para el matemático, dominar en todo su alcance el universo matemático. La mayoría se conforman con jugar con los primeros peldaños del infinito. Pero sabemos que éstos no son más que parte de una jerarquía interminable. Eso da problemas a los que tratan de definir a Dios como «aquello mayor que lo cual no puede ser pensado». En cierto sentido, una cosa así no existe porque siempre hay un modo de pensar algo más grande. Pero si retomamos la idea de algo más allá de lo cual los humanos no podemos imaginar, volvemos a las cosas que como humanos no podemos conocer: las limitaciones al conocimiento que impone nuestra propia biología.

LO QUE NUNCA SABREMOS

Entonces, ya al final de mi viaje hasta las fronteras del conocimiento, ¿he encontrado cosas de las que se pueda decir categóricamente que nunca sabremos? Aquello que pensé que nunca sabríamos, como si el universo es infinito o no, ha resultado no ser tan inabordable como pensé. Podemos usar las matemáticas para emplear medios finitos con el fin de probar la existencia del infinito. Así que, aunque nunca podamos explorar o ver más allá de la burbuja finita que engloba el universo al que tenemos acceso físico, podríamos ser capaces de saber, usando solamente el poder de nuestras mentes, lo que hay más allá.

Comprender la naturaleza del tiempo antes de la Gran Explosión era otra de las fronteras que consideré inexpug-

nable. Pero en ese muro también se han abierto grietas. Progresos recientes nos han proporcionado métodos para teorizar e incluso quizá detectar pruebas de la existencia de un tiempo antes del momento en el que creíamos que todo empezó. Y sin embargo, da la sensación de que la cuestión de si el tiempo tuvo un comienzo o se extiende infinitamente hacia el pasado permanecerá durante bastante tiempo todavía en los libros científicos.

Por el contrario, parece que lo infinitamente pequeño del interior del dado que tengo en mis manos será algo que quedará para siempre fuera del alcance de un conocimiento completo. Cada generación pensó que había alcanzado ya lo indivisible, y luego vio cómo la materia se descomponía en piezas aun mas pequeñas. ¿Cómo vamos a poder saber si los constituyentes básicos del universo tal y como los vemos hoy—quarks, electrones, neutrinos—no son tan divisibles como lo fueron las demás partículas que se fueron descubriendo al ir pelando la cebolla de la realidad? De hecho, la física cuántica postula actualmente un límite que marca hasta dónde podremos penetrar en nuestras pesquisas sobre lo que hay en el interior del dado: más allá de la longitud de Planck, sencillamente es zona vedada. Existe una frontera más allá de la cual es imposible saber qué ocurre.

Que sea posible ahondar o no en el conocimiento sobre la frontera que constituye nuestra conciencia es una cuestión sujeta a permanente cambio. ¿Se desvanecerá este desafío como una frontera del conocimiento al descubrirse que es en realidad una cuestión mal planteada? ¿La respuesta llegará finalmente a través de una estrategia parecida a la que han aplicado los científicos para explicar la esencia de la vida? No hay ningún *élan vital*, sino solamente una serie de procesos químicos que significan que un grupo de moléculas tienen vida. ¿O el problema de la conciencia será algo que nunca podremos comprender porque estamos encerrados en nuestra propia conciencia y no podemos entrar en la de otros?

La posibilidad de que nunca podamos saber porque estamos confinados en el sistema es un tema común a muchos de los problemas que he tratado de abordar. Las matemáticas tienen verdades que permanecerán indemostrables dentro de un sistema. Si salimos de él, podemos saber, pero esto crea un nuevo sistema que tendrá sus propias verdades indemostrables.

La idea de que un experimento cuántico pueda repetirse es una quimera, porque nunca podremos aislar el experimento del universo en el que se realiza, un universo que habrá cambiado y evolucionado para cuando queramos volver a realizar el experimento.

Hasta las matemáticas que se han inventado para comprender los dados son en cierto modo una fantasía. ¿Qué es la probabilidad? Si lanzamos el dado 600 veces, esperamos sacar 100 veces un 6. Pero lo que realmente queremos es tirar el dado una sola vez y saber algo sobre el número que va a salir. Las ecuaciones de la teoría del caos nos dicen que gran parte del futuro depende de calibrar extraordinariamente bien los decimales de los datos que se introducen en las ecuaciones. Así que nunca podremos conocer el presente de un modo tan completo que nos dé una oportunidad de conocer el pasado o el futuro.

Las limitaciones físicas del cerebro humano, incluso de la capacidad computacional del universo mismo, imponen límites a la cantidad de cosas que podremos saber, de modo que siempre habrá cosas fuera del alcance de nuestro conocimiento. Pero ésta no es una imposibilidad absoluta de conocer. Como la luz proveniente de los últimos confines del universo, antes de que descubriéramos que la expansión del universo se producía aceleradamente, si esperamos el tiempo suficiente acabará llegando hasta nosotros. Si esperamos el tiempo suficiente, también un ordenador podría ir probando todas las verdades demostrables de las matemáticas. Sin embargo, como reveló la exploración que hicimos sobre

las fronteras del tiempo, ¿qué pasa si el tiempo mismo se acaba mientras estamos esperando?

Las limitaciones del lenguaje están en el núcleo de muchos de los límites del conocimiento, pero podrían seguramente evolucionar y cambiar. Ciertamente, muchos filósofos identifican el lenguaje como un problema cuando se trata de estudiar la cuestión de la conciencia. Comprender la física cuántica es uno de esos problemas, porque el único lenguaje que nos permite manejar esas ideas son las matemáticas. Si tratamos de traducir las matemáticas al lenguaje de las experiencias cotidianas, se producen los absurdos que hacen que la física cuántica sea todo un reto. De modo que la incognoscibilidad de la posición y el momento no es realmente una imposibilidad genuina de conocer. Es más bien un fallo en la traducción de las matemáticas al lenguaje natural.

No obstante, tenemos que reconocer siempre que estamos maniatados por el modo de pensar propio de cada época histórica. Comte creyó que nunca conoceríamos los elementos constituyentes de una estrella. Qué equivocado estaba. Así que me pregunto: la apuesta más segura ¿no será decir que no podemos saber nunca verdaderamente y con certeza qué es lo que no podemos saber?

¿ES DIOS UN NÚMERO IMAGINARIO?

¿Hasta dónde podemos llegar creando soluciones a problemas aparentemente irresolubles? Durante muchos siglos los matemáticos consideraron la ecuación $x^2 = -1$ y pensaron que no tenía solución. Pero entonces se asumió un punto de vista más creativo: creemos una solución para esta ecuación. Admitimos a los números complejos en el mundo de las matemáticas definiendo el número i como aquel cuyo cuadrado es igual a -1 . ¿Por qué funciona esto? Porque no produce contradicciones en la teoría. Entrelazamos este concepto con las matemáticas conocidas y comenzamos así a conocer i . Y lo

más importante es que nos permite acceder a regiones nuevas y fascinantes del mundo matemático. El no haber admitido a los números imaginarios en las matemáticas habría limitado su extensión y poder. Pero el punto importante es no atribuir al concepto más propiedades de las que tiene.

¿Qué ocurriría si tratamos de ser creativos con algunas de nuestras cuestiones imposibles de conocer? Veamos qué ocurre, por ejemplo, si definimos a Dios como la solución a la cuestión «¿por qué algo en vez de nada?». Se supone que este concepto no es nada más y nada menos que la solución a esa pregunta, es decir, ésa es su definición. No tiene ninguna propiedad más. Es esa incógnita. Incluso en el caso de que alcancemos algún conocimiento nuevo sobre la cuestión, eso solamente implicará que sabemos más sobre ese Dios que fue definido como la solución a la cuestión «¿por qué algo en vez de nada?».

Pero hay que tener cuidado con este modo de plantearse las cosas. Solamente por escribir una ecuación matemática no nos aseguramos que vaya a tener una solución. Admitir un concepto nuevo que resuelve $x^2 = -1$ fue provechoso porque proporcionó acceso a matemáticas nuevas consistentes. Para los platónicos, la idea ya estaba ahí, esperando a que la articuláramos; para otros, fue un acto creativo que enriqueció nuestro mundo matemático. Pero si escribimos las ecuaciones del último teorema de Fermat y tratamos de usar números que las resuelvan, nos encontraremos con enunciados que se contradicen entre sí. Así fue, al fin y al cabo, como Wiles probó que las ecuaciones no podían resolverse.

El problema de muchas religiones es que el Dios que ofrecen posee demasiadas cualidades que no tienen nada que ver con la definición. Es como si trabajáramos hacia atrás, centrándonos en las extrañas propiedades evocadas a lo largo de generaciones, sin comprender realmente cuál fue la definición original. Nos encontramos con esta descripción ilegítima cuando somos niños y luego, cuando planteamos la pregunta

«¿Por qué hay algo en vez de nada?», ya no vale realmente como solución. Pero nos han mostrado la visión equivocada.

Por eso yo me declaro ateo. Para mí, esto significa que rechazo las soluciones clásicas que las religiones suelen ofrecer a fin de resolver estas incógnitas. Pero quizá no tendría que rechazarlo todo. Hay cosas que siempre seguirán siendo desconocidas, así que quizá ese Dios sí que existe. El argumento tradicional contra el Dios de lo desconocido es que deberíamos esforzarnos por conocer a Dios, por tener una relación personal con este concepto. Y este Dios, definido como lo trascendental o desconocido, excluye por su misma definición la posibilidad de conocerlo.

Pero el problema con esta definición de Dios es que realmente no nos permite llegar mucho más lejos. Mientras que el definir un número cuyo cuadrado es -1 produjo una rica serie de consecuencias, el definir algo como la respuesta a la pregunta «¿Por qué hay algo en vez de nada?» no da lugar a nada nuevo. Tenemos que fabricar propiedades para esta cosa que no salen de la definición. Como expresó con elocuencia Karen Armstrong, este alto Dios es demasiado alto.

Hay varias reacciones a la hora de afrontar lo incognoscible. Una es dejarlo tal cual: si es incognoscible, no puede conocerse. Pero también puede sentirse uno tentado de elegir una de las soluciones y vivir la vida de acuerdo con ella. Quizá la reacción lógicamente más consistente sea estar abierto a una solución de muchos mundos y permitir que todas las soluciones corran paralelas hasta que nuevas ideas vayan desbancando a las viejas. Los matemáticos están encantados de explorar un mundo matemático en el que la hipótesis del continuo es cierta y se sienten también muy a gusto con unas matemáticas paralelas en las que se supone que es falsa.

Al llegar ya al final de mi exploración de los límites del conocimiento, me pregunto, no obstante, si no deberé cambiar de opinión y dejar de declararme ateo. Con mi definición, la existencia de Dios significa la existencia de cosas que no pode-

mos conocer, así que declararme ateo significaría que creo que no hay nada que no podamos conocer. Pero ya no creo esto. En cierto sentido, creo que he probado que este Dios sí que existe. Ahora se trata de explorar qué otros rasgos posee este Dios.

Mi declaración de ateísmo es realmente sólo una reacción a las versiones de Dios, bastante empobrecidas, que ofrecen la mayoría de las religiones y culturas. Rechazo la existencia de una inteligencia sobrenatural que interviene en la evolución del universo. Es un rechazo del Dios al que la gente asigna extrañas cualidades—como compasión, sabiduría, amor—que no tienen sentido en el contexto de la idea de Dios que estoy explorando.

Esta definición y esta postura no serán del agrado de todas las partes. Los ateos militantes no quieren admitir nada que se llame Dios en el debate, mientras que los que creen en algún Dios criticarán el concepto de Dios basado en lo incognoscible y lo tacharán de débil y desencaminado. ¿Qué hacemos entonces con este Dios de lo incognoscible?

Quizá la lección importante es que hay que mantenerse en un estado mental un poco esquizofrénico. Una mentalidad plural. Por un lado, hemos de asumir que como humanos no podemos conocerlo todo. Hay probablemente límites para el conocimiento. Tal actitud humilde es importante intelectualmente, ya que sin ella viviríamos sumidos en el espejismo y la desmesura. Por otro lado, no podemos saber en todas las ocasiones qué quedará para siempre fuera del alcance de nuestra comprensión. Por eso es esencial para un científico no rendirse antes de tiempo. Creer que encontraremos respuestas. Creer que quizá podamos saberlo todo.

¿TENGO UN NÚMERO PAR O UN NÚMERO IMPAR DE DADOS?

Mi viaje por la ciencia ha revelado una serie de desafiantes fronteras del conocimiento. Pero está también la pura y sim-

ple cuestión epistemológica básica de si es posible o no saber algo. Hace dos mil años Sócrates dijo: «Sólo sé que no sé nada». La aceptación de la propia ignorancia es la única auténtica afirmación de sabiduría.

Se ha escrito una buena cantidad de volúmenes de filosofía que tratan de la teoría del conocimiento y que intentan determinar lo que podemos saber y definir lo que significa el conocimiento. Platón propuso que el conocimiento debería definirse como la «creencia cierta y justificada», pero Bertrand Russell y el filósofo estadounidense Edmund Gettier pusieron en duda que esta definición capte el verdadero significado de saber.

El ejemplo clásico propuesto por Bertrand Russell cuenta la historia de una mujer que mira un reloj que marca las dos en punto. Ella cree por lo tanto que son las dos en punto. Su creencia está justificada, y ella así lo siente, porque eso es lo que dice el reloj. Y es verdad que son las dos en punto. Ahora bien, resulta que de hecho el reloj se paró hace doce horas, y ha sido una mera coincidencia que la mujer mirara el reloj exactamente doce horas después.

Gettier creó situaciones parecidas para poner a prueba la «creencia cierta y justificada». Una persona mira un campo y ve lo que cree que es una vaca. De ello infiere que hay una vaca en el campo. De hecho, hay una vaca en el campo, de modo que la conclusión es cierta, pero no se la ve porque está en una hondonada del terreno. Esa persona está en posesión de un enunciado correcto. Está basado en una creencia justificada, ya que la cosa que estaba viendo era exactamente igual que una vaca. Pero el hecho de que el enunciado sea cierto no implica conocimiento.

Podemos imaginarnos una situación en la que hemos llegado a un enunciado sobre el universo que es cierto, pero la justificación del mismo es completamente incorrecta, aunque nos haya llevado a un enunciado que es cierto. Parece claro que eso no significa que sabemos que el enunciado

es cierto. Con frecuencia he construido demostraciones de resultados matemáticos ciertos que resultaron tener algún error lógico (que espero siempre localizar antes de enviarlas a una revista para su publicación). Pero mi prueba falsa no puede justificar mi conocimiento de que el enunciado matemático es cierto.

No sé si la hipótesis de Riemann es cierta o falsa. Sin embargo, ha habido gente que se ha presentado con lo que ellos creen que son demostraciones correctas de esta hipótesis, y aportan páginas y páginas de ecuaciones para respaldar su creencia. En la mayoría de los casos se encuentra un fallo. Una vez mostrado éste al proponente, esa creencia justificada se desvanece. Pero ¿qué pasaría si esa demostración falsa convenciera a todo el mundo? Supongamos que el fallo es tremendamente sutil. No podemos decir que sabemos que la conjetura de Riemann es cierta a pesar de nuestra creencia cierta y justificada. Sin duda la justificación ha de ser también verdadera para conducir a una creencia cierta y justificada.

Algunos astrónomos de la Antigüedad propusieron que la Tierra gira alrededor del Sol, pero su justificación de este hecho no era correcta. El filósofo indio Iagñavalkia justificó esta creencia en un sistema solar heliocéntrico en el siglo IX a. C. con este razonamiento: «El Sol tiene ensartados en una cuerda a todos estos mundos: la Tierra, los planetas y la atmósfera». ¿Podemos decir que sabía que la Tierra gira alrededor del Sol?

Creo que estoy de acuerdo con mi colega del New College Timothy Williamson cuando en su libro *Knowledge and its Limits* (El conocimiento y sus límites) afirma que el conocimiento habría de ser considerado como un concepto fundamental, algo cuya definición no dependiera de otras cosas. Parece que todos sabemos lo que significa *saber*. Ésta es una de las aproximadamente cien palabras que tienen una traducción equivalente en todas las lenguas de la Tierra, lo cual no ocurre con otras palabras tan básicas como *comer*.

Gracias a Williamson, también aprendí un ardid lógico fantástico que se conoce como la paradoja de la incognoscibilidad, que prueba que, a menos que lo sepamos todo, siempre habrá verdades que por su propia naturaleza son incognoscibles. Se atribuye esta paradoja al lógico estadounidense Frederic Fitch, que la publicó en un artículo en 1963. Él reconoció que la fuente original del argumento fue un comentario hecho en 1945 por un evaluador anónimo de un artículo que Fitch había enviado a una revista pero que finalmente no apareció publicado. Durante muchos años la identidad del evaluador que ideó esta joya lógica permaneció sumida en el misterio. Pero labores detectivescas posteriores siguieron la pista del informe manuscrito, y el análisis de la letra reveló que el autor fue el famoso lógico estadounidense Alonzo Church, que hizo importantes aportaciones a la comprensión del teorema de incompletitud de Gödel.

El argumento de Church tiene un toque de la estrategia autorreferente que empleó Gödel, pero esta vez no aparecen las matemáticas, todo es pura lógica. Y mientras Gödel prueba que hay verdades matemáticas que nunca pueden probarse dentro de un sistema axiomático consistente concreto de las matemáticas, Church da un paso más, prometiendo una verdad que nunca será conocida por ningún medio.

Supongamos que existen enunciados que no sabemos que son ciertos. De hecho, hay muchos enunciados así. Por ejemplo, mi casa está llena de dados, no sólo tenemos los dados de casino de mi mesa de trabajo. Los hay en la caja del Monopoly, en el juego de parchís, perdidos detrás de algún sofá, enterrados en el caos de las habitaciones de mis hijos. No sé si en mi casa existe un número par o un número impar de dados. Esto en sí mismo no constituye, por supuesto, un enunciado incognoscible, porque podría emprender una búsqueda sistemática por la casa para hallar la respuesta. Pero es una pregunta de la que ciertamente, en este momento, no conozco la respuesta.

Toca ahora aguantar la respiración: esta parte es la que hace que me dé vueltas la cabeza cada vez que la leo. De los dos enunciados siguientes, llamemos p al único de los dos que es cierto: «hay un número par de dados en mi casa» y «hay un número impar de dados en mi casa». Desconozco cuál de los dos es cierto, pero uno de ellos ha de serlo. La existencia de una verdad incognoscible parte de la existencia de esta verdad desconocida. La siguiente proposición es una verdad incognoscible: « p es cierto pero desconocido». La proposición es sin duda cierta. ¿Por qué es incognoscible? Porque saber eso implica que sabemos que p es cierto y desconocido, pero eso es una contradicción porque p no puede ser desconocido y conocido a la vez. Así que la proposición « p es cierto pero desconocido» es ella misma una proposición incognoscible. No se está afirmando que la propia p sea incognoscible. Como ya dijimos, siempre puedo revisar la casa y encontrar todos los dados que hay en ella, y saber si es un número par o impar. Es la metaproposición « p es cierto pero desconocido» la que es incognoscible. La demostración funciona siempre que haya algo cierto pero desconocido. El único modo de que todas las verdades sean cognoscibles es que todas las verdades sean conocidas.

Aunque ha terminado siendo conocida como paradoja, no hay aquí paradoja alguna, como el mismo Williamson señala. Es sencillamente una prueba de que existen verdades incognoscibles. Después de todos mis viajes hasta los límites de la ciencia, resulta que una ingeniosa triquiñuela lógica proporciona la grieta que andaba buscando.

¿PODEMOS SABER ALGO?

Muchos filósofos del conocimiento se han preguntado cuánto podemos en realidad saber sobre un asunto dado. El filósofo escocés David Hume, que vivió en el siglo XVIII, identificó uno de los problemas fundamentales que hemos en-

contrado en muchas de las cuestiones que he abordado: la de estar encerrados dentro del sistema. Si vamos a aplicar métodos científicos para establecer que sabemos algo, entramos en un círculo vicioso porque estamos usando argumentos científicos y lógicos para probar que estos métodos son fiables. Es imposible adoptar un punto de vista externo. Wittgenstein resumió esta idea con una expresión bastante escatológica: «No se puede cagar más alto que el culo».

¿Qué pasa en el caso de las matemáticas? Sin duda en este campo contamos con ciertos conocimientos. Por ejemplo, la demostración de que existen infinitos números primos, ¿no nos da una certeza total sobre la realidad de este hecho? Incluso las demostraciones matemáticas, aunque todo esté sobre la mesa, van a tener que ser procesadas por el cerebro humano para verificar que la prueba es correcta. ¿Qué ocurre si todos estamos convencidos de la corrección de un argumento que sin embargo encierra un error sutil? Por supuesto, una de las cosas que aprovechamos es el hecho de que cualquier error fatal acabará finalmente saliendo a la luz por sí solo. Pero entonces ¿no significa esto que las matemáticas, como las ciencias, están sujetas a un proceso evolutivo? El filósofo matemático Imre Lakatos así lo creía. Desarrolló una filosofía de las matemáticas que estaba inspirada en la visión de Popper de las ciencias como disciplinas en las que solamente se puede probar que algo es falso, y nunca probar que algo es cierto. Para Lakatos, nunca puede saberse si una prueba oculta un error sutil que ha sido pasado por alto.

Su libro *Pruebas y refutaciones* presenta un diálogo fascinante entre varios estudiantes que exploran la demostración del teorema de Euler sobre la relación entre el número de vértices, aristas y caras de un poliedro tridimensional. Refleja la historia de la evolución de este teorema: $A = V + C - 2$. Al principio, los estudiantes piensan que han conseguido una prueba. Entonces uno de ellos propone un poliedro con un agujero en medio. La fórmula no funciona para este polie-

dro. Tampoco la demostración. Una interpretación es que la demostración funciona para los poliedros para los cuales estaba diseñada. A continuación se introduce un nuevo teorema, con una nueva demostración, que corresponde a una nueva fórmula que, además de los vértices, aristas y caras incluye el número de agujeros del poliedro. La historia revela un enfoque del conocimiento matemático mucho más evolutivo que lo que estarían dispuestos a reconocer muchos matemáticos, más afín al proceso de investigación científica. En todo caso, ¿cuán efectivo es este proceso en el descubrimiento de la verdad?

Una de las razones para pensar que la ciencia produce verdadero conocimiento es su porcentaje de éxitos. La ciencia es tan eficaz en su descripción y su predicción del modo de ser aparente de las cosas que sentimos que se acerca a una realidad que para muchos de nosotros existe realmente. El hecho de que la ciencia funcione tan bien a la hora de hacer predicciones y explicar fenómenos es quizá la mejor medida que existe de que estamos próximos a la verdad. Si el mapa que usamos nos lleva sistemáticamente a nuestro destino, qué mejor prueba puede haber de que es una representación exacta de la realidad.

La ciencia ha descrito el universo bastante bien. Las sondas espaciales se posan en lejanos planetas gracias a nuestros descubrimientos sobre la naturaleza de la gravedad. Las terapias génicas ayudan a abordar enfermedades antes intratables gracias a nuestros descubrimientos sobre la biología de la célula. El dispositivo GPS nos ayuda ahora a encontrar la mejor ruta para llegar a nuestro destino, gracias a que supimos explotar en su momento nuestros conocimientos más profundos sobre el espacio y el tiempo para ponerlo a punto. Cuando el mapa científico no funciona, estamos bien dispuestos a volver a perfilar sus contornos para encontrar una descripción que nos ayude eficazmente a hacer frente a nuestro entorno. Es la teoría de la supervivencia del mejor adap-

tado: el éxito continuado a la hora de hacer predicciones y controlar nuestro entorno implica que la teoría sobrevive. La ciencia no puede representar la realidad, pero no hay nada parecido a una opción alternativa.

A partir de Kant, hemos tenido que luchar contra la incognoscibilidad de las «cosas en sí mismas». Los límites de la percepción humana, subrayados por lo fácilmente que son engañados nuestros sentidos, plantea cuestiones sobre hasta qué punto nuestro cerebro puede conocer la realidad. ¿No estamos contemplándolo todo con las gafas que llevamos para mirar el universo?

Uno de los problemas claves en nuestros intentos por conocer el mundo es que accedemos a ese conocimiento a través de nuestros sentidos, y con argumentos analíticos asimilamos ese conocimiento y lo ampliamos. Sugerimos interpretaciones que integran toda la información que recogen nuestros sentidos. La invención del telescopio, del microscopio y del escáner fMRI ha ampliado el campo de lo que podemos percibir con los sentidos.

Pero ¿qué pasaría si hubiera cosas en el universo que nuestros sentidos no pueden detectar? Tenemos otros sentidos además de los que la gente reconoce: aparte de la vista, el oído, el gusto, el olfato y el tacto, poseemos también un sentido llamado propiocepción, la capacidad de sentir la propia postura corporal con respecto al medio que nos rodea. Asimismo, disfrutamos de sentidos que nos informan sobre el estado interno de nuestro cuerpo. Los fluidos del oído interno nos dicen cómo varía la posición de nuestro cuerpo en relación a la gravedad. Pero ¿existen fenómenos físicos que se nos escapan porque no disponemos de las herramientas sensoriales necesarias para interactuar con ellos?

Consideremos un organismo sin ojos o sin neuronas para detectar la luz. Si no dispone de ningún medio para acceder a las ondas electromagnéticas, ¿cómo podría desarrollar una teoría del electromagnetismo? A nosotros nos ha venido muy

bien combinar nuestro sentido de la vista, que puede detectar una parte del espectro electromagnético, con el análisis matemático para deducir la existencia de otras partes del espectro. Después desarrollamos herramientas que pueden detectar esas otras ondas y convertirlas en cosas que podemos interpretar. Pero ¿podríamos haber conseguido todo esto sin haber tenido la capacidad de acceder, a través de nuestro sentido de la vista, a una porción del espectro?

Es posible que las limitaciones de nuestros sentidos limiten también el tipo de matemáticas que podemos conocer. A pesar de que las matemáticas están todas en la mente, existe una escuela de pensamiento que sugiere que, al ser la nuestra en definitiva una inteligencia encarnada en el cuerpo, el conocimiento que podemos obtener de las matemáticas está limitado al que puede ser materializado. Desde luego es cierto que si observamos las matemáticas que conocemos, normalmente tienen su origen en la descripción del mundo físico. Tomemos, por ejemplo, los números imaginarios: el lector podría preguntarse cómo pueden materializarse, y sin embargo emergen del acto de medir longitudes en objetos geométricos. Es el acto de comprender la diagonal que cruza una de las caras de mi dado de casino lo que empujó a los babilonios a considerar la raíz cuadrada de 2. Y a partir de aquí arranca el viaje que conduce a la idea de la raíz cuadrada de -1 .

Hay partidarios de la inteligencia artificial que sostienen que si pretendemos crear una inteligencia que se iguale a la nuestra, tiene que estar materializada físicamente. En otras palabras, un cerebro que viva exclusivamente en la memoria de un ordenador no podrá generar una inteligencia como la nuestra sin interactuar físicamente con el mundo a través de un cuerpo. Es una hipótesis desafiante. ¿Podría haber partes del mundo matemático que están fuera de nuestro alcance porque no tienen su origen en conceptos materializados físicamente?

Aun así, ahí está la profunda cuestión filosófica de hasta

qué punto nuestros sentidos nos permiten conocer algo con absoluta seguridad. Ya hemos visto cómo se puede engañar a nuestros sentidos y hacerles creer cosas que resultan ser ilusiones de la mente. Por ejemplo, ¿cómo podemos estar seguros de que el universo, tal y como lo percibimos, no es una simulación? Como vimos en la sexta «frontera», podemos hacer creer a alguien que está en el cuerpo de otra persona. Pero entonces, ¿cómo podemos estar seguros de que no somos sencillamente cerebros en un tarro que son alimentados artificialmente con información sensorial por un ordenador y que todo el mundo que nos rodea no es más que una ilusión?

Mi reacción ante dicho intento de menoscabar todo lo que sabemos es responder que este libro ha intentado explorar cómo podemos saberlo todo de esa simulación. Kant creía que siempre permanecerá oculto a nuestra vista cómo son realmente las cosas. Lo más que podremos saber es su apariencia. Creo que la mayoría de los científicos dedican cierto tiempo a leer sobre este debate que concierne a la ontología y a la epistemología, y escuchando a filósofos que cuestionan el hecho de que la ciencia pueda realmente decirnos cómo es esa simulación. Y luego vuelven a su ciencia, diciéndose: si no podremos saber nunca cómo es la realidad, déjenos al menos tratar de decir cómo es la realidad que detectamos a través de nuestros sentidos. Al fin y al cabo, ésta es la que nos afecta.

Así que lo mejor que podemos esperar es que la ciencia nos proporcione un conocimiento verosímil del universo; esto es, que nos dé una interpretación que parezca describir la realidad. Creemos que una teoría que haga que nuestra experiencia del mundo sea inteligible es una teoría que está próxima a la auténtica naturaleza del universo, aunque los filósofos nos digan que nunca sabremos. Como afirmó Niels Bohr: «Es erróneo pensar que la finalidad de la física es descubrir cómo es la naturaleza. La física se ocupa de lo que podemos decir sobre la naturaleza».

Pero ¿qué pasa con las cosas que no podemos saber? Si algo está fuera del alcance de la investigación científica, si es incognoscible, ¿no habrá quizá alguna otra disciplina que tenga más posibilidades de abordar con éxito la incógnita? Aquí tenemos a Martin Rees peleando con la cuestión de «por qué hay algo en vez de nada»: «El misterio primordial es por qué existe algo, así sin más. ¿Qué insufló vida a las ecuaciones y las puso en marcha en un cosmos real? Semejantes cuestiones se encuentran, sin embargo, fuera de la ciencia: son terreno para filósofos y teólogos».

Quizá esto sea rendirse demasiado pronto, pero es sin duda verdad que la ciencia florece cuando compartimos las incógnitas con otras disciplinas. Si lo incognoscible influye en cómo planteamos nuestras vidas, merece la pena disponer de medios para sondear las consecuencias de elegir una respuesta a lo incognoscible. La música, la poesía, la narrativa y el arte son voces poderosas a la hora de explorar las implicaciones de lo incognoscible.

Consideremos la cuestión de si el universo es infinito. Creer que el espacio no se acaba nunca tiene consecuencias interesantes. El hecho de que a lo largo del universo pueda haber infinitas copias de uno mismo leyendo este libro podría tener un efecto profundo en el modo de plantearse uno la vida, aunque no podamos saber nunca si eso es cierto o no.

La teoría del caos implica que no sólo los dados de casino, sino también los seres humanos, somos en algunos aspectos parte de lo incognoscible. Aunque seamos sistemas físicos, ninguna base de datos, por grande que sea, nos ayudará a predecir completamente el comportamiento humano. Las ciencias humanas son el mejor lenguaje que tenemos para comprender lo mejor posible la esencia de lo humano.

Los estudios que indagan en la conciencia sugieren que hay límites que no podemos traspasar. Nuestro mundo interior es incognoscible en potencia para otros. Pero ¿no es

ésta la razón por la que escribimos y leemos novelas? Es el método más efectivo para permitir a otros el acceso a nuestro mundo interior.

Lo que nunca podremos saber deja un espacio para el mito, para las narraciones, para la imaginación, y también para la ciencia. Podemos no saber, pero eso no nos impide inventar historias para llenar el espacio de lo desconocido, y estas historias son cruciales a la hora de aportar materiales para lo que pueda llegar algún día a ser conocido. Sin estas historias, tampoco tendríamos ciencia.

Wittgenstein concluyó su *Tractatus logico-philosophicus* con la famosa frase: «De lo que no se puede hablar, hay que callar». Yo creo que ésta es una actitud derrotista, como el mismo Wittgenstein pensó en una época posterior de su vida. Un desenlace mejor habría sido: «De lo que no se puede saber, nuestra imaginación saca materia para jugar». Al fin y al cabo, contando historias es como emprendimos el viaje que nos llevó a saber lo que sabemos.

Ese viaje ha sido siempre impulsado por lo que no sabemos. Como dijo Maxwell: «La ignorancia plenamente consciente es el prelude de cada avance real en la ciencia». Ciertamente pienso que esto es verdad en lo que concierne a las matemáticas. Necesito creer que hay una solución y que puedo encontrarla, para tener alguna posibilidad de conservar la fe cuando me aventuro en lo desconocido. Ser conscientes de que no sabemos es crucial para hacer progresos. Stephen Hawking reconoce el peligro de creer que lo sabemos todo: «El mayor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, sino la ilusión del conocimiento».

Para mí, las conjeturas de las matemáticas, las cosas que no hemos demostrado, son su savia vital. Las cosas que no sé son las que me impulsan a continuar mis investigaciones matemáticas. Quiero saber si la hipótesis de Riemann es cierta, y si la hipótesis PORC, a la que he dedicado mis investigaciones de las últimas décadas, es falsa. Como afirmó Jacob

Bronowski: «El conocimiento humano es personal y responsable, una aventura sin fin en el filo de la incertidumbre».

La importancia del destino aún no alcanzado queda ilustrada por la extraña reacción que tienen muchos matemáticos cuando se demuestra por fin un gran teorema matemático. Igual que se experimenta una sensación de tristeza al terminar una gran novela, la conclusión de una búsqueda matemática puede provocar también su propia sensación de melancolía. Creo que estábamos disfrutando tanto con el reto de la ecuación de Fermat que experimentamos una sensación de depresión mezclada con la euforia con la que se recibió la solución de Andrew Wiles a este enigma de 350 años de antigüedad.

Es importante reconocer que tenemos que convivir con la incertidumbre, con lo desconocido, con lo imposible de conocer. Aunque consiguiéramos finalmente elaborar una teoría que describiera cómo funciona el universo, nunca sabríamos si falta o no un nuevo capítulo de la historia, esperando a que lo descubramos. Nunca podemos saber si hemos llegado o no al final de la historia. Por mucha certeza que imploremos, si queremos hacer ciencia tenemos que estar siempre preparados para dejar atrás nuestras interpretaciones actuales. Pero gracias a esto mismo la ciencia sigue viva y nunca se fosilizará.

Así que quizá es importante que acepte la incertidumbre sobre el futuro de mi dado de casino mientras baila sobre mi mano. Y una vez que la abandona, quizá el no saber cómo caerá es lo que hace que no lo pierda de vista cuando choca contra la mesa y rebota en ella una y otra vez.

AGRADECIMIENTOS

Muchas gracias a todas las personas que ayudaron a hacer posible este libro:

Mi editora de 4th State: Louise Haines.

Mi agente en Greene and Heaton: Antony Topping.

Mi editora de mesa: Sarah Thickett.

Mi ilustrador: Joy Gosney.

Mi corrector de originales y mis correctores de pruebas: Eddie Mizzi, Jan McCann, Stephen Guise.

Mis lectores: Andreas Brandhuber, Joseph Conlon, Pedro Ferreira, Chris Lintott, Dan Segal y Christiane Timmel.

Mis entrevistados: Bob May, Melissa Franklin, John Polkinghorne, John Barrow, Roger Penrose y Christof Koch.

Mis superiores en el Instituto Matemático, el Departamento de Formación Continua, el New College, la universidad de Oxford.

Mi mecenas: Charles Simonyi.

Mi familia: Shani, Tomer, Magaly e Ina.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Todas las ilustraciones han sido creadas por Joy Gosney, excepto las siguientes:

FRONTERA 1

- p. 34 Pirámide de dados © Raymond Turvey.
- p. 57 Trayectoria caótica. Construida usando «El problema restringido de los tres cuerpos en el plano», Proyecto de animaciones de Wolfram: <https://www.demonstrations.wolfram.com/RestrictedThreeBodyProblemInAPlane/>
- p. 79 Árbol fractal de la evolución. Ilustración adaptada de imágenes generadas por One Zoom Tree of Life Explorer: <https://www.one.zoom.org/index.html>
- p. 85 Campos magnéticos © Joe McLaren.
- p. 89 Cuatro gráficas que describen el comportamiento del dado. Ilustración adaptada de M. Kapitaniak, J. Strzalko, J. Grabski y T. Kapitaniak, «The three-dimensional dynamics of the die throw», *Chaos*, 22, n.º 4, 2012.

FRONTERA 2

- p. 117 Átomos en el interior de un dado. Yikrazuul / Wikimedia Commons / Dominio público.
- p. 121 *Les atomes*, de Jean Baptiste Perrin. (Dibujo en formato SVG de Mirai Warren) / Dominio público.

FRONTERA 3

- p. 210 Gráfica reproducida con permiso de la Sociedad Americana de Física, de: C. G. Shull, «Single-Slit Diffraction of Neutrons», *Physical Review*, vol. 179, 1969, p. 752. © 1969 por la Sociedad Americana de Física: <https://www.dx.doi.org/10.1103/PhysRev.179.752>

FRONTERA 5

- p. 359 Entropía. Ilustración adaptada de Roger Penrose, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Oxford, Oxford University Press, 1989. [Existe traducción en español: *La nueva mente del emperador: sobre ordenadores, cerebros y las leyes de la física*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Grijalbo, 1991].
- p. 367 Diagrama CCC © Roger Penrose, *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*, Londres, Bodley Head, 2010. [Existe traducción en español: *Los ciclos del tiempo. Una extraordinaria nueva visión del universo*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Debate, 2011].

FRONTERA 6

- p. 393 Dibujo de una neurona. Reproducido con permiso del Legado Cajal, Instituto Cajal, Madrid.
- p. 417 Pureza, por Randall Munroe: <https://www.xkcd.com/xkcd.com/435>.
- p. 429 Insomnio / Sueño profundo. Ilustración basada en imágenes de Marcelo Massimini, Fabio Ferrarelli, Reto Huber, Steve K. Esser, Harpreet Singh y Giulio Tononi, «Breakdown of Cortical Effective Connectivity During Sleep», *Science*, 309, 2005, pp. 2228-2232.
- p. 434 Dos imágenes de redes con 8 nodos. Reproducidas con permiso de los autores. Giulio Tononi y Olaf Sporns, «Measuring information integration», *BMC Neuroscience*, 4, 2003.

LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- [AGUSTÍN DE HIPONA, *La ciudad de Dios*, trad. Santos Santamaría del Río y Miguel Fuertes Lanero, Madrid, Homo Legens, 2006.
- , *Confesiones*, trad. Ángel Custodio Vega, Madrid, BAC, 2013].
- AL-KHALILI, Jim, *Quantum: A Guide for the Perplexed*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2003. [Existe traducción en español: *Cuántica. Guía de perplejos*, trad. Dulcinea Otero-Piñeiro, Madrid, Alianza, 2016].
- [ARISTÓTELES, *Metafísica*, trad. Valentín García Yebra, Madrid, Gredos, 2012].
- ARMSTRONG, Karen, *A Short History of Myth*, Edimburgo, Canongate, 2005. [Existe traducción en español: *Breve historia del mito*, trad. Gemma Rovira Ortega, Barcelona, Salamandra, 2005].
- , *The Great Transformation: The World in the Time of Buddha, Socrates, Confucius and Jeremiah*, Londres, Atlantic Books, 2006. [Existe traducción en español: *La gran transformación. El mundo en la época de Buda, Sócrates, Confucio y Jeremías. El origen de las tradiciones religiosas*, trad. Ana Herrera Ferrer, Barcelona, Paidós, 2007].
- , *The case for God*, Londres, Bodley Head, 2009. [En defensa de Dios, trad. A. López Tobajas y M. Tabuyo, Barcelona, Paidós, 2009].
- AYER, A. J., *Language, Truth, and Logic*, Londres, Victor Gollancz, 1936. [Existe traducción en español: *Lenguaje, verdad y lógica*, trad. Marcial Suárez, Valencia, Publicacions de la Universitat de València, 1992].
- , *The Problem of Knowledge*, Harmondsworth, Penguin, 1956. [Existe traducción en español: *El problema del conocimiento*, trad. Andrés R. Raggio, Buenos Aires, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1962].
- BAGGINI, Julian, *Atheism: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2003.

- BAGGOTT, Jim, *Farewell to Reality: How Fairytale Physics Betrays the Search for Scientific Truth*, Londres, Constable, 2013.
- BARBOUR, Julian, *The End of Time: The Next Revolution in Physics*, Oxford, Oxford University Press, 1999.
- BARROW, John, *Impossibility: The Limits of Science and the Science of Limits*, Oxford, Oxford University Press, 1998. [Existe traducción en español: *Imposibilidad. Los límites de la ciencia y la ciencia de los límites*, trad. Carlos de la Reta, Barcelona, Gedisa, 1999].
- , *The Constants of Nature*, Londres, Jonathan Cape, 2002. [Existe traducción en español: *Las constantes de la naturaleza. Los secretos más ocultos del Universo*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Crítica, 2006].
- BARROW-GREEN, June, *Poincaré and the Three-Body Problem*, Providence (Rhode Island)-Londres, American Mathematical Society-London Mathematical Society, 1997.
- BAYNE, Tim, *The Unity of Consciousness*, Oxford, Oxford University Press, 2010.
- BLACKBURN, Simon, *Truth: A Guide for the Perplexed*, Londres, Allen Lane, 2005. [Existe traducción en español: *La verdad. Guía de perplejos*, trad. Antonio-Prometeo Moya, Barcelona, Crítica, 2006].
- BLACKMORE, Susan, *Consciousness: An Introduction*, Londres, Hodder & Stoughton, 2003.
- , *Conversations on Consciousness*, Oxford, Oxford University Press, 2005. [Existe traducción en español: *Conversaciones sobre la conciencia*, trad. Francesc Forn, Barcelona, Paidós, 2010].
- BONDI, Hermann, *Relativity and Common Sense: A New Approach to Einstein*, Nueva York, Doubleday, 1964.
- BORGES, Jorge Luis, *Ficciones*, Madrid, Alianza, 1997.
- [BRONOWSKI, Jacob, *El ascenso del hombre*, trad. Pedro Pacheco, Madrid, Capitán Swing, 2017].
- BUTTERWORTH, Jon, *Smashing Physics: Inside the World's Biggest Experiment*, Londres, Headline, 2014.
- [CARROLL, Lewis, *Alicia en el país de las maravillas*, trad. Pilar Torralba, Madrid, Akal, 2005].
- CARROLL, Sean, *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time*, Londres, Oneworld, 2011. [Existe traducción en español: *Desde la eternidad hasta hoy. En busca de la teo-*

- ría definitiva del tiempo*, trad. Marcos Pérez Sánchez, Barcelona, Debate, 2015].
- CLOSE, Frank, *Particle Physics: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2004.
- , *The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe*, Oxford, Oxford University Press, 2013.
- CONLON, Joseph, *Why String Theory?*, Boca Ratón (Florida), CRC Press, 2015.
- COX, Brian y Jeff Forshaw, *Why Does $E=mc^2$? (And Why should We Care?)*, Boston, Da Capo Press, 2009. [Existe traducción en español: *¿Por qué $E=mc^2$? (¿y por qué debería importarnos?)*, trad. Marcos Pérez Sánchez, Barcelona, Debate, 2013].
- DAWKINS, Richard, *The Blind Watchmaker. Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design*, Harlow (Essex), Longman, 1986. [Existe traducción en español: *El relojero ciego. Por qué la evolución de la vida no necesita de ningún creador*, trad. Manuel Arroyo Fernández, Barcelona, Tusquets, 2015].
- , *The God Delusion*, Londres, Bantam, 2006. [Existe traducción en español: *El espejismo de Dios*, trad. Natalia Pérez-Galdós, Barcelona, Espasa, 2012].
- DENNETT, Daniel, *Consciousness Explained*, Boston, Little, Brown, 1991. [Existe traducción en español: *La conciencia explicada. Una teoría interdisciplinar*, trad. Sergio Balari Ravera, Barcelona, Paidós, 1995].
- DEUTSCH, David, *The Fabric of Reality*, Londres, Allen Lane, 1997. [Existe traducción en español: *La estructura de la realidad*, trad. David Sempau, Barcelona, Anagrama, 1999].
- [*Dhammapada*, trad. Juan Mascaró, Barcelona, Penguin, 2015].
- DIXON, Thomas. *Science and Religion: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2008.
- DU SAUTOY, Marcus, *The Music of the Primes*, Londres, Fourth State, 2003. [Existe traducción en español: *La música de los números primos*, trad. J. Miralles de Imperial Llobet, Barcelona, Acantilado, 2007].
- , *Finding Moonshine*, Londres, Fourth State, 2008. [Existe traducción en español: *Simetría. Un viaje por los patrones de la naturaleza*, trad. Eugenio Jesús Gómez Ayala, Barcelona, Acantilado, 2009].
- , *The Number Mysteries*, Londres, Fourth State, 2010. [Existe

- traducción en español: *Los misterios de los números. La odisea de las matemáticas en la vida cotidiana*, trad. Eugenio Jesús Gómez Ayala, Barcelona, Acantilado, 2012].
- EDELMAN, Gerald y Giulio Tononi, *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*, Nueva York, Basic Books, 2000. [Existe traducción en español: *El universo de la conciencia. Cómo la materia se convierte en imaginación*, trad. Joan Lluís Riera, Barcelona, Crítica, 2002].
- FERREIRA, Pedro, *The State of the Universe: A Primer in Modern Cosmology*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2006.
- , *The Perfect Theory: A Century of Geniuses and the Battle over General Relativity*, Boston, Little, Brown, 2014. [Existe traducción en español: *La teoría perfecta. Un siglo de figuras geniales y de pugnas por la teoría general de la relatividad*, trad. Beatriz Eguibar y Tomás Fernández Aúz, Barcelona, Anagrama, 2015].
- FEYNMAN, Richard, Robert Leighton y Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Reading (Massachusetts), Addison-Wesley, 1964, disponible en línea en <feynmanlectures.caltech.edu>. [Existe traducción en español en tres volúmenes: *Física*, vol. I: *Mecánica, radiación y calor*, trad. Hugo Espinosa D., Carlos Alberto Heras, Juan Martín y Marfil y Enrique Oelker L.; *Física*, vol. II: *Electromagnetismo y materia*, trad. Omar Bernaola, Carlos Alberto Heras y Rafael López Frontado; *Física*, vol. III: *Mecánica cuántica*, trad. Carlos Alberto Heras y Juan Martín y Marfil, Ciudad de México, Addison-Wesley, 1998-2000].
- [—, *El carácter de la ley física*, trad. Antoni Bosch, Barcelona, Tusquets, 2005].
- GAMOW, George, *Mr Tompkins in Paperback*, Cambridge, Cambridge University Press, 1965. [Existe traducción en español: *Breviario del señor Tompkins. En el país de las maravillas y La investigación del átomo*, trad. Francisco González Aramburo, Madrid, FCE, 1993].
- GLEICK, James, *Chaos: Making a New Science*, Londres, Heinemann, 1988. [Existe traducción en español: *Caos. La creación de una ciencia*, trad. Juan Antonio Gutiérrez-Larraya, Barcelona, Crítica, 2012].
- GOLDSTEIN, Rebecca, *36 Arguments for the Existence of God. A work of fiction*, Londres, Atlantic Books, 2010.
- GREENE, Brian, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Di-*

- mensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, Nueva York, W. W. Norton, 1999. [Existe traducción en español: *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*, trad. Mercedes García Garmilla, Barcelona, Crítica, 2001].
- , *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality*, Nueva York, Knopf, 2004. [Existe traducción en español: *El tejido del cosmos. Espacio, tiempo y la textura de la realidad*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Crítica, 2006].
- , *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos*, Nueva York, Knopf, 2011. [Existe traducción en español: *La realidad oculta. Universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Crítica, 2011].
- GUTH, Alan, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Reading (Massachusetts), Addison-Wesley, 1997. [Existe traducción en español: *El universo inflacionario. La búsqueda de una nueva teoría sobre los orígenes del cosmos*, trad. Fabián Chueca, Madrid, Debate, 1999].
- HAWKING, Stephen, *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*, Londres, Bantam, 1988. [Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros, trad. Miguel Ortuño Ortín, Madrid, Alianza, 2011].
- [— y Roger Penrose, *La naturaleza del espacio y el tiempo*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Debate, 2012].
- KAKU, Michio, *Hyperspace: A Scientific Odyssey Through the 10th Dimension*, Oxford, Oxford University Press, 1994. [Existe traducción en español: *Hiperespacio. Una odisea científica a través de universos paralelos, distorsiones del tiempo y la décima dimensión*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Crítica, 2016].
- KAPITANIAK, M., J. Strzalko, J. Grabski y T. Kapitaniak, «The three-dimensional dynamics of the dice throw», *Chaos*, 22, n.º 4, 2012.
- KOCH, Christof, *The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach*, Greenwood Village (Colorado), Roberts & Company, 2004. [Existe traducción en español: *La consciencia. Una aproximación neurobiológica*, trad. Joan Soler, Barcelona, Ariel, 2005].
- , *Consciousness: Confessions of a Romantic Reductionist*, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, 2012.

- KRAUSS, Lawrence, *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing*, Nueva York, Free Press, 2012. [Existe traducción en español: *Un universo de la nada*, trad. Cecilia Belza y Gonzalo García, Barcelona, Pasado & Presente, 2013].
- KURZWEIL, Ray, *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Nueva York, Viking, 2005. [Existe traducción en español: *La Singularidad está cerca. Cuando los humanos transcendemos la biología*, trad. Carlos García Hernández, Berlín, Lola Books, 2012].
- , *How to Create a Mind: The Secrets of Human Thought Revealed*, Nueva York, Viking, 2012. [Existe traducción en español: *Cómo crear una mente. El secreto del pensamiento humano*, trad. Carlos García Hernández, Berlín, Lola Books, 2013].
- LAKATOS, Imre, *Proofs and Refutations: The Logic of Mathematical Discovery*, Cambridge, Cambridge University Press, 1976. [Existe traducción en español: *Pruebas y refutaciones. La lógica del descubrimiento matemático*, trad. Carlos Solís Santos, Madrid, Alianza, 1978].
- LAPLACE, Pierre-Simon, *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, trad. Pilar Castillo, Barcelona, Altaya, 1995].
- LASKAR, Jacques y Mickael Gastineau, «Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth», *Nature*, 459, 2009, pp. 817-819.
- LEVIN, Janna, *How the Universe Got Its Spots: Diary of a Finite Time in a Finite Space*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 2002. [Existe traducción en español: *Cómo le salieron las manchas al universo. Diario de un tiempo finito en un espacio finito*, trad. Tamara Gil Somoza, Madrid, Lengua de Trapo, 2002].
- LIGHTMAN, Alan, *Einstein's Dreams*, Nueva York, Warner Books, 1994. [Sueños de Einstein, trad. Carlos Peralta, Barcelona, Tusquets, 1993].
- LIVIO, Mario, *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant and the Beauty of the Cosmos*, Nueva York, John Wiley & Sons, 2000.
- [LUCRECIO, *De la naturaleza*, introd. Stephen Greenblatt; trad. Eduard Valentí Fiol, Barcelona, Acantilado, 2012].
- MADDOX, John, *What Remains to be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life and the Future of the Hu-*

man Race, Nueva York, Free Press, 1998. [Existe traducción en español: *Lo que queda por descubrir. Una incursión en los problemas no resueltos por la ciencia, desde el origen de la vida hasta el futuro de la humanidad*, trad. Juan Manuel Ibeas, Madrid, Debate, 1999].

MAY, Robert M., «Simple mathematical models with very complicated dynamics», *Nature*, 261, 1976, pp. 459-467.

MCCABE, Herbert. *God Still Matters*, Londres, Continuum, 2002.

MONK, Ray, *Ludwig Wittgenstein: The Duty of Genius*, Londres, Jonathan Cape, 1990. [Existe traducción en español: *Ludwig Wittgenstein. El deber de un genio*, trad. Damián Alou, Barcelona, Anagrama, 1994].

MULHALL, Stephen, *Wittgenstein's Private Language: Grammar, Nonsense and Imagination in Philosophical Investigations*, Oxford, Clarendon Press, 2006.

—, *The Great Riddle: Wittgenstein and Nonsense, Theology and Philosophy*, Oxford, Oxford University Press, 2015.

NAGEL, Jennifer, *Knowledge: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2014.

[PASCAL, Blaise, *Pensamientos*, introd., trad. y notas Carlos Pujol, Barcelona, Planeta, 1986; y trad. Xavier Zubiri, Madrid, Alianza, 2004].

POINCARÉ, Henri, *Science and Method*, Londres, Thomas Nelson, 1914. [Existe traducción en español: *Sobre la ciencia y su método*, trad. M. García Miranda, L. Alonso, A. B. Besio y J. Banfi, Barcelona, Círculo de Lectores, 1997].

POLKINGHORNE, John, *Belief in God in an Age of Science*, New Haven (Connecticut), Yale University Press, 1998.

—, *Quantum Theory: A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2002.

—, *Quantum Physics and Theology: An Unexpected Kinship*, Londres, SPCK, 2007.

PENROSE, Roger, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*, Oxford, Oxford University Press, 1989. [Existe traducción en español: *La nueva mente del emperador*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Debolsillo, 2015].

—, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Londres, Jonathan Cape, 2004. [Existe traducción en es-

- pañol: *El Camino a la Realidad. Una guía completa de las Leyes del Universo*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Debate, 2015].
- , *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*, Londres, Bodley Head, 2010. [Existe traducción en español: *Ciclos del tiempo. Una extraordinaria nueva visión del universo*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Debate, 2010].
- PETERSON, Ivars, *Newton's Clock: Chaos in the Solar System*, Nueva York, Freeman, 1993. [Existe traducción en español: *El reloj de Newton. Caos en el sistema solar*, trad. Rosa Weigand, Madrid, Alianza, 1995].
- RAMACHANDRAN, V. S., *A Brief Tour of Human Consciousness: From Impostor Poodles to Purple Numbers*, Nueva York, Pi Press, 2004.
- RANDALL, Lisa, *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, Bodley Head, 2011. [Existe traducción en español: *Llamando a las puertas del cielo. Cómo la física y el pensamiento científico iluminan el universo y el mundo moderno*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Acantilado, 2013].
- REES, Martin, *Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 1999. [Existe traducción en español: *Seis números nada más. Las fuerzas profundas que ordenan el universo*, trad. Fernando Velasco, Madrid, Debate, 2001].
- , *From Here to Infinity: Scientific Horizons*, Londres, Profile Books, 2011.
- [RUSHDIE, Salman, *Hijos de la medianoche*, trad. Miguel Sáenz, Barcelona, Literatura Random House, 2011].
- SAARI, Donald y Zhihong Xia, «Off to infinity in finite time», *Notices of the American Mathematical Society*, 42, n.º 5, 1995, pp. 538-546.
- SACKS, Jonathan, *The Great Partnership: God, Science and the Search for Meaning*, Londres, Hodder & Stoughton, 2011. [Existe traducción en español: *La gran alianza. Dios, ciencia y la búsqueda de sentido*, trad. Patricia Rodríguez Pérez, Madrid, Nagrela, 2013].
- SAMPLE, Ian, *Massive: The Hunt for the God Particle*, Londres, Virgin Books, 2010.
- SEUNG, Sebastian, *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us*

Who We Are, Nueva York, Houghton Mifflin Harcourt, 2012. [Existe traducción en español: *Conectoma. Cómo las conexiones neuronales determinan nuestra identidad*, trad. Ferran Meler Ortí, Barcelona, RBA, 2012].

SILK, Joseph, *The Infinite Cosmos: Questions from the Frontiers of Cosmology*, Oxford, Oxford University Press, 2006.

SINGH, Simon, *Fermat's Last Theorem*, Londres, Fourth State, 1997. [Existe traducción en español: *El enigma de Fermat. La historia de un teorema que intrigó durante más de trescientos años a los mejores cerebros del mundo*, trad. David Galadí y Jordi Gutiérrez, Barcelona, Ariel, 2015].

—, *Big Bang: The Most Important Scientific Discovery of All Time and Why You Need to Know About It*, Londres, Fourth State, 2004. [Existe traducción en español: *Big Bang. El descubrimiento más importante de todos los tiempos y todo lo que hay que saber acerca del mismo*, trad. Josep Sarret i Grau, Vilassar de Dalt (Barcelona), Biblioteca Buridán-Ediciones de Intervención Cultural, 2008].

SMOLIN, Lee, *Time Reborn: From the Crisis of Physics to the Future of the Universe*, Londres, Allen Lane, 2013.

STEANE, Andrew, *The Wonderful World of Relativity: A Precise Guide for the General Reader*, Oxford, Oxford University Press, 2014.

—, *Faithful to Science: The Role of Science in Religion*, Oxford, Oxford University Press, 2014.

STEWART, Ian, *Does God Play Dice? The New Mathematics of Chaos*, Oxford, Basil Blackwell, 1989. [Existe traducción en español: *¿Juega Dios a los dados? La nueva matemática del caos*, trad. Miguel Ortuño, Jesús Ruiz Martínez y Rafael García Molina, Barcelona, Crítica, 2007].

STOPPARD, Tom, *Arcadia*, Londres, Faber & Faber, 1993.

SUDBERY, Anthony, *Quantum Mechanics and the Particles of Nature: An Outline for Mathematicians*, Cambridge, Cambridge University Press, 1986.

TALEB, Nassim, *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*, Londres, Allen Lane, 2007. [Existe traducción en español: *El cisne negro. El impacto de lo altamente improbable*, trad. Roc Filella Montfort y Albino Santos Mosquera, Barcelona, Paidós, 2011 (ed. rev. y ampliada)].

- TEGMARK, Max, «The Mathematical Universe», *Foundations of Physics*, 38, 2008, pp. 101-150.
- , *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*, Nueva York, Knopf, 2014. [Existe traducción en español: *Nuestro universo matemático. En busca de la naturaleza última de la realidad*, trad. Dulcinea Otero-Piñeiro, Barcelona, Antoni Bosch, 2015].
- TONONI, Giulio, «Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto», *Biol. Bull.*, 215, n.º 3, 2008, pp. 216-242.
- , *Phi. A Voyage from the Brain to the Soul*, Nueva York, Pantheon, 2012.
- y Olaf Sporns, «Measuring information integration», *BMC Neuroscience*, 4, 2003.
- WATTS, Fraser y Christopher Knight (eds.), *God and the Scientist: Exploring the Work of John Polkinghorne*, Farnham (Surrey), Ashgate, 2012.
- WEINBERG, Steven, *Dreams of a Final Theory: The Search for the Fundamental Laws of Nature*, Londres, Hutchinson Radius, 1993. [Existe traducción en español: *El sueño de una teoría final. La búsqueda de las leyes fundamentales de la naturaleza*, trad. Javier García Sanz, Barcelona, Crítica, 1997].
- WILLIAMSON, Timothy, *Knowledge and its Limits*, Oxford, Oxford University Press, 2000.
- [WITTGENSTEIN, Ludwig, *Investigaciones filosóficas*, trad. Luis M. Valdés Villanueva, Barcelona, Crítica, 1988].
- WOIT, Peter, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Continuing Challenges to Unify the Laws of Physics*, Londres, Jonathan Cape, 2006.
- YOURGRAU, Palle, *A World Without Time: The Forgotten Legacy of Gödel and Einstein*, Nueva York, Basic Books, 2005. [Existe traducción al español: *Un mundo sin tiempo. El legado olvidado de Gödel y Einstein*, trad. Rafael de las Heras, Barcelona, Tusquets, 2007].
- ZEE, Anthony, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton (Nueva Jersey), Princeton University Press, 2003.
- La página web de la Enciclopedia Stanford de Filosofía está llena de material interesante: <http://plato.stanford.edu/>

ÍNDICE

- abducción, teoría de la 292
- Academia de Ciencias de París, Real 250
- Academia de Ciencias de Suecia, Real 54
- Academia Francesa de Ciencias 54
- Acta Mathematica*, revista de la Real Academia de Ciencias de Suecia 54
- ADN 7, 11, 73, 74, 78, 80, 404
- Agencia Espacial Europea 236
- agujeros negros
 - creación electrónica de diminutos agujeros negros, posibilidad de 160
- Cygnus x-1 347
- densidad infinita y 348
- descubrimiento de los 343-346
- entropía y 358-361 364, 368
- futuro del universo y 365, 368
- Gran Explosión y 368-369
- información perdida 211, 357, 360, 361, 363-364
- radiación cósmica de fondo y 369
- radiación de Hawking y 230-231, 361-362
- segunda ley de la termodinámica y 358, 364
- simulaciones por ordenador 444
- singularidad 349-354
- «teorema de la ausencia de pelo» 357
- tiempo 354-356
- Agustín, san 33, 372
 - La ciudad de Dios* 493
 - Confesiones* 312
- aleatoriedad 91, 166, 168, 193, 219
- alfa, partículas 126, 127-129, 127, 152, 165
- álgebra 114-116, 469, 471
- Alhazen: *Libro de óptica* 249
- Allen, Paul G. 437
- Allen, Woody 381
- Allen de Ciencias del Cerebro, Instituto 437, 438
- Alpha Centauri (estrella) 236
- Al-Sufi, Abh al-Rahman 255
- Amiot, Lawrence 351
- Anderson, Carl 132, 133
- Andrómeda (nebulosa) 255
- anestesia 420-421, 427, 435
- animales
 - clasificación de especies 136
 - consciencia 398-401, 405, 409
 - dinámica de las poblaciones 64-68
 - evolución 74-76, 80
 - matemáticas del reino animal 496-497
- Aniston, Jennifer 10, 407-410, 436, 452
- antimateria 132

- aones 366
 Apple 405, 447
 Arago, François 248
 argumento cosmológico 512
 Aristarco de Samos 237-238
 Aristóteles 33, 46, 105, 121, 129,
 249, 385, 463, 464, 492
Metafísica 7, 8
 Armstrong, Karen 228, 518
 Arquímedes 110
 Asociación Americana para el
 Avance de la Ciencia 61
 Asociación Británica para el
 Avance de la Ciencia 19
 asteroides 8, 230
 Asteroids (juego) 257-258
 astronomía 55, 244, 247, 266,
 270, 279, 299, 300, 351, 371
 átomo 101, 102-103
 carga 124, 125, 126, 127-129,
 132, 133, 135, 136, 137, 139,
 140-141, 149, 150, 151, 158,
 172, 179, 288-289, 448
 dados y 84, 101, 116-119, 120,
 131
 descubrimiento de los compo-
 nentes más pequeños 122-
 161
 descubrimiento 102, 122-130,
 131, 132
 extrañeza 137, 139-141, 147
 Gran Colisionador de Hadro-
 nes y 10, 126
 justificación experimental de
 la visión atomística de la
 materia 103, 114-119
 medida del tiempo y 156, 311,
 314-315, 318, 337
 microscopios cuánticos y 101
 microscopios electrónicos
 y 101
 movimiento browniano y 119-
 122
 número atómico 115
 simetría y 141-148, 152, 153, 159
 tabla periódica y 111-119
 visión teórica atomística de la
 materia, historia de la 100-
 113, 119-120
 átomo de hidrógeno 101, 110,
 124, 125, 128
 autoreconocimiento, los animales
 y la prueba 398-401,
 axiomas 69, 463, 464, 468,
 475-477, 479, 483-489, 502,
 504-510
 babilónico arcaico, período 106,
 107
 babilonios 106, 107, 314, 527
 Bach, Johann Sebastian 99, 100,
 154, 383
 Bacon, Francis 504
 Banco de Cerebros de la Sociedad
 de Enfermedad de Parkinson
 del Reino Unido 386, 394
 bancos, teoría del caos y 71
 Barbour, Julian: *El fin del tiem-
 po* 376
 barión delta 138, 138, 139
 bariones 136, 138-139, 138, 146
 bariones lambda 136, 146, 150
 bariones sigma 136, 146
 Barrow, John 296, 297-302, 304
 Beit Guvrin, Israel, excavaciones
 arqueológicas en 31
 Bell, John/teorema de Bell 215,
 218-219

- Berger, Hans 395
- Berkeley, obispo: *El analista* 112
- Berkeley, Universidad de 146
- Berlín, Academia de 481
- Berlín, Observatorio de 247, 248
- Berlín, Universidad de 503
- Bessel, Friedrich 252-253
- Besso, Michele 372
- beta, ondas 396, 397
- beta, partículas 126, 165
- Biblia 242
- Big Bang véase Gran Explosión
- biología 298, 510, 523
- animal véase animales
- avances 10
- de la consciencia véase consciencia
- evolución de la vida y 73-81, 288
- incógnitas 14-16
- limitaciones de nuestra 512
- telómeros, descubrimiento de 11-12
- teoría hipotética y 510
- terapia génica 525
- Birch y Swinnerton-Dyer, conjetura de 473
- Blair, Tony 69
- Bohr, Niels 131, 157, 166, 201, 225, 528
- Bois-Reymond, Emil du 481-482
- Boltzmann, Ludwig 118
- Bombelli, Rafael 468
- Borges, Jorge Luis: *La biblioteca de Babel* 235
- bosón de Higgs 10, 341, 443, 449
- Boyle, Robert 111
- El químico escéptico* 111
- Bradwardine, Thomas 494
- Brady, Nicholas: «Oda a santa Cecilia», 113
- Brahmagupta 468
- Braudel, Fernand 72
- Broca, Paul 388, 443
- Bronowski, Jacob 531
- Ascent of Man* 9
- Brown, Robert 119-120
- movimiento browniano 119, 177
- Bruno, Giordiano: *Del infinito, el universo y los mundos* 241-242, 496
- budismo 143, 446
- cálculo 42, 43, 44-45, 46, 48, 50, 52, 84, 107, 111, 112, 127, 244, 464
- calor, flujo del 48
- Caltech 132, 134, 146, 220, 363, 404, 406, 407, 437
- cámara de niebla 128, 132, 133, 135
- cambio climático 13, 70
- Cámbrico, período 76
- Cambridge, Universidad de 42, 90, 220, 226, 296, 344, 347, 420
- camino óctuple 143
- cáncer 15, 257
- Candelas, Philip 195, 196
- Cantor, Georg 87, 495, 496-507, 512
- caos, teoría del 39, 50, 56, 59, 63, 67-70, 72-73, 76, 79-83, 90-94, 199, 212, 225, 226, 304, 360, 508, 515, 522, 529
- Cardano, Girolamo 34-35, 37
- Liber de ludo aleae* 35

- Carro o del Arado, constelación
del 239, 240, 266
- Carroll, Lewis: *Alicia en el país de las maravillas* 201
- Carroll, Sean 296
- cascada, partículas 140
- Cassini, Giovanni 250
- Castro, Patricia 283
- catódicos, rayos 123
- cefeida, estrella 254, 255-257
- celuloide 117
- cerebro
animal 398-401
área de Broca 388, 443
artificial 443-445
células, diferentes tipos de 438
cerebelo 385, 386, 433
consciencia y, véase consciencia
cuerpo caloso/cirugía de cuerpo caloso 389-392
dos hemisferios 387-392
enfermedad de Alzheimer 395
escáner EEG 383, 395-398, 406, 428
escáner fMRI 383, 397-398, 406, 419-427, 441, 442, 446, 449
estado vegetativo/bloqueado 419-421
experiencias extracorporales y 414-416
glándula espinal 386
hemisferio derecho 388, 390
hemisferio izquierdo 388, 389-390
inconsciente 396, 423-424, 427-430
libre albedrío y 48-452
límites de la comprensión del 12-13, 18, 474, 475, 488, 516, 524, 526
música y, véase música
neuronas y 11, 12, 323, 325, 389, 392-395, 407-412, 427, 429, 431, 432-435, 437, 438, 440, 441, 442, 445, 452, 474
ondas alfa y 395-398
problema cuerpo-mente y 416-418
procesado de datos visuales 403-416
prueba de autoreconocimiento y 399-402
sinapsis 12, 394, 395, 408
teoría de integración de la información (ITT) y 430-434
ventrículos 385-386
- Cerebro Humano, proyecto 443
- cesio, fuente de 315
- Chadwick, James 128, 129
- Chalmers, David 437
- Chandrasekhar, Subrahmanyan 344
- Chaos* (revista) 87
- China 25, 467
- Chomsky, Noam 490
- Church, Alonzo 522
- Cicerón 236
- ciencia/descubrimiento científico
búsqueda de las leyes definitivas de la naturaleza 17
crecimiento exponencial en 10-11, 16-17
cuestiones que nunca podrán resolverse 17, 18-22, 370-371, 437, 441, 445, 448-453, 511-512, 513-531

- matemáticas en contraste
 - con 459-460
- naturaleza en constante evolu-
 - ción 458-460
- omnipresencia 7-8
- parece solamente describir la
 - realidad 528
- porcentaje de éxitos y pro-
 - ducción de conocimiento
 - auténtico 525
- cisne negro 300, 301
- Clairaut, Alexis 41
- Cleverbot (aplicación) 381-382,
 - 418, 426
- Cohen, Paul 505, 507
- Compton, longitud de onda
 - de 211
- Comte, Auguste 18, 19, 254, 437,
 - 516
- consciencia 381-453, 508
 - anestesia y 420-421
 - animales y 398-401, 405, 409
 - aplicación Cleverbot y 381-
 - 382, 418, 426
 - atención y 411-412
 - budismo y 446
 - cerebro como localización de
 - la 384-392
 - con diferentes propieda-
 - des 384
 - concepto de Dios y 402-403,
 - 439
 - «conectoma» y 433
 - conmutación cerebral entre
 - percepciones y 403-407
 - construcción de un cerebro
 - artificial que tiene 443-445
 - cubo de Necker y 404, 406
 - Descartes y 382, 441, 453
 - ¿dónde está? 384-389
 - dos hemisferios del cerebro
 - y 387-391
 - EKG/fMRI y 383, 395-398,
 - 406, 419-426, 428, 441,
 - 442, 446, 449
 - estado vegetativo/bloquea-
 - do 419-421
 - estimulación magnética
 - transcraneal (TMS) y 427-
 - 430
 - experiencias extracorporales
 - y 412-416
 - experimento de la habitación
 - china y 426
 - fórmula matemática para 430-
 - 434, 436, 437, 440, 443,
 - 445-446
 - función de onda y 197
 - gafas de realidad virtual y 415
 - humanidades y expresión
 - de 529
 - inconsciencia y actividad del
 - cerebro 396, 423-424,
 - 427-430
 - internet y 434-436
 - lenguaje y 449-451
 - libre albedrío y 421
 - misterianismo y 440, 442
 - muerte y 445-447
 - naturaleza incognoscible 437,
 - 440, 444-445, 448-453, 514
 - neuronas y 392-395, 407-414,
 - 428, 429, 431, 432-436,
 - 437, 438, 440, 441, 442,
 - 445, 452
 - ordenadores/máquinas y 16,
 - 381-382, 34, 399, 405, 425-
 - 426, 435

- perceptronium y 448
- primera aparición en el universo 402-403
- problema cuerpo-mente y 403-405
- problema difícil de la 382-384, 436-437, 453
- Proyecto Cerebro Humano y 443
- prueba de reconocimiento en el espejo y 399-401
- qualia y 409, 441
- sinestesia y 384, 409-410
- sistema talamocortical y 432
- sueño y 427-430, 432
- surgimiento en los niños 402
- teoría de la información integrada (IIT) y 430-434, 435, 437, 439, 441, 445-446
- tipos de células cerebrales y 438
- visión y 405-406
- consciencia de uno mismo 382, 399, 434
- «conectoma» 433
- Conferencias Navideñas de la Institución Real 9
- Congreso Internacional de Matemáticos 481
- Connes, Alain 377
- conocimiento
 - cátedra del profesor sabelotodo 11-14
 - ciencia como una interpretación que solamente parece que describe la realidad 528
 - ciencias humanas como el mejor lenguaje para lo que significa ser humano 529
 - consciencia de que no sabemos como motor crucial para el progreso 530
 - creencia verdadera y justificada y 520-521
 - definiciones de 520
 - deseo de saber 8
 - incognoscibilidad de las «cosas en sí mismas» 526, 528
 - lo desconocido sabido 14-17
 - lo que no podemos saber 528-531
 - lo que no sabemos 14-17
 - lo que nunca sabremos 18-22
 - lo que sabemos 10-11
 - paradoja de la incognoscibilidad 522
 - ¿podemos saber algo? 519, 528
 - ¿podremos saber alguna vez lo que nunca sabremos? 304-306
 - porcentaje de éxitos de la ciencia y producción de conocimiento auténtico 525
 - sabiendo que no puede saberse 64-68
 - teorema de incompletitud de Gödel y 475, 483-490, 507-508, 522
 - véase también* demostración y bajo el epígrafe de área individual de conocimiento
- constante cosmológica 268, 280, 288
- continuo, hipótesis del 505, 509, 510, 511, 518

- Copérnico, Nicolaus 243, 264, 299
- cosmología
 de los antiguos griegos 104-105
 energía oscura y 280
 homogeneidad y 294, 383
 religión y 294-301
véase también bajo el epígrafe individual de cosmología
- Couch Adams, John 247
- Coulson, Charles 25
- Crick, Francis 404, 437
- cristiandad 22-23, 33, 91, 302, 493
véase también Dios; religión
- «cuadratura del círculo» 470
- cuerdas, teoría de 161, 212, 293
- cuerpo calloso, cirugía del 388-391
- cuerpo-mente, problema 416
- Curtis, Heber 256
- curvatura negativa 263
- Cusano, Nicolás de 241
- Cygnus X-1, 346, 347
- dados
 agujeros negros y 357, 363
 cálculo y 43-45, 46, 48, 112
- Cardano y 34-35
- consciencia y 383, 388, 404, 409, 425, 431
- conjunto de Cantor y 86-87
- desintegración del uranio y 167, 200
- Dios y 33
- entrelazamiento cuántico y 217-218
- estructura atómica de 95, 99, 100-102, 104, 106-108, 112, 117-118, 120, 131, 141-144, 154, 159, 161, 220, 235
- evolución y 74-75, 77
- forma del universo y 237, 260-261, 262
- infinito y 235, 237, 275, 304-305
- leyes del movimiento de Newton y 46, 49-50, 88, 100-101, 112, 195
- lo que nunca podremos saber y 513, 515, 522, 529, 530
- microscopio y 101, 102
- mundo antiguo y los 32, 44, 45
- Pascal/Fermat y 36-40
- predicción de los resultados de la tirada de, historia de 31-40
- principio de incertidumbre y 203, 206-207, 211
- simetría y 141-148, 152, 154, 159
- teorema de Bell y 215
- teoría del caos y 16-17, 59, 63, 72, 87-89, 199, 515, 529
- Dalai Lama 296, 446
- Dalton, John 114
- Darboux, Gaston 54
- Darwin, Charles 73, 74
- Dawkins, Richard 296, 298
El espejismo de Dios 22, 25
- De la Rue, Warren 19
- Delos, oráculo de la isla de 470-471
- demencia 401
- demonstración
 conocimiento seguro y errores en las demostraciones

- matemáticas 54-57, 475,
483-489, 507-508, 519-525
- nacimiento de la idea 460-
464
- oportunidad de establecer un
estado de conocimiento más
permanente 13, 461-462
- por contradicción 107, 305
- Dennett, Daniel 451
- Descartes, René 249, 382, 386,
416, 417, 441, 453, 468, 512
- desplazamiento hacia el rojo 269,
277-278
- Dhammapada, El* 419
- Diofanto 467
- Aritmética* 472
- Dios
 - apuesta de Pascal y 39-40,
50, 304
 - autor y 23-24
 - Barrow y 296-302, 304
 - colapso de la función de onda
y 225-226
 - concepto de Erdős de El Libro
y 475-476
 - consciencia y 402-403, 439,
447
 - conocer los deseos de los
dioses 31-33
 - cosmología y 295-297, 512
 - creación de la idea de 23, 304
 - cuestión de por qué hay algo
en vez de nada y 227-229
 - cuestiones no resueltas del uni-
verso y 25, 228, 508-509,
516-519
 - dados y 32, 39-40, 50, 90-93,
304
 - Dawkins y 22, 25, 296, 298
 - definición de como las cosas
que no podemos saber 24-
25, 90-93
 - «Dios de lo incognoscible»
24-25, 518-519
 - evolución de Darwin y 288
 - física cuántica y 220, 225-226,
228
 - infinito y 228, 239-242, 372-
375, 493, 496, 502-503,
507, 512
 - leyes definitivas de la naturale-
za y 17
 - matemáticas como un medio
para probar la existencia
de 24, 38-40, 475-476
 - mentalidad plural y 519
 - multiverso y 287-295, 304
 - Newton y 49, 93
 - número imaginario como
un 516-519
 - Polkinghorne y 91, 220-227,
302, 447
 - principio de incertidumbre
y 225-226, 227-228
 - probabilidad y 31-33, 39-40,
50, 90-93, 304
 - regresión infinita y 228-229,
507, 512
 - teoría de los aeones y 371-372
 - teoría del caos y 90-93, 225-
226
 - vida después de la muerte
447
- Dirac, Paul 132, 220
- doble rendija, experimento
de 171, 180, 181, 185, 186, 187,
189, 191-192, 203, 216, 218
- Doppler, efecto 268, 336

- Douspis, Marian 283
- dualismo 416, 417, 418
- ecolocalización 76
- Eddington, Arthur 339, 340-341, 348
- EEG, escáner 383, 395, 396, 397, 398, 406, 428
- Egipto, antiguo 460, 463
- Ehrsson, Henrik 414-416
- Einstein, Albert 166, 345, 346, 348, 375
- agujeros negros y 348
- constante cosmológica y 268, 280
- $E=mc^2$ y 137, 211
- efecto fotoeléctrico y 178, 179, 180, 185
- entrelazamiento cuántico y 217-218
- equivalencia, principio de 334-337
- espacio-tiempo, reacción al concepto de 328, 331
- física cuántica y 166, 214, 216, 217-218
- modelo de la luz 175, 177-178, 179, 180, 185
- movimiento browniano y 119-122, 156
- religión y 372
- teoría de la relatividad especial 19, 133, 177, 180, 310, 315, 317-331, 372, 375
- teoría de la relatividad general 12, 13, 15, 180, 212, 268, 273, 275, 310, 332, 334-341, 342, 345, 348, 353, 361, 368, 375
- universo expansivo y 268-270
- élan vital* 451, 452, 514
- electricidad, experimentos de Thomson para comprender la 122
- electromagnetismo 48, 173, 526
- electrón 64, 514
- átomo de hidrógeno y 343
- descubrimiento 122, 123, 125, 126, 128, 130
- efecto fotoeléctrico y 177
- experimento de la doble rendija de Young y 181-197, 203-205, 216, 218
- fuerza electromagnética y 136
- masa 160-161, 288
- modelo de la luz como partícula y 172, 176-180
- muón y 132-134
- principio de incertidumbre y 167, 211-215
- quarks y 151-152, 158-159, 160, 161
- tabla periódica de los elementos y 131, 135, 147, 159
- teoría de cuerdas y 161
- teoría del caos y 92, 508
- Elkies, Noam 472
- enana blanca 344
- energía oscura 278, 280, 294, 459
- entorno, efecto del hombre sobre 7, 8, 15, 32, 74-75, 84, 87, 119
- entropía de un sistema 358-362, 364, 368
- envejecimiento 12, 15, 323
- epilépticos, ataques 389, 407, 410

- epistemología 92, 214-215, 224,
226, 227, 282, 520, 528
- equilibrio puntuado 80
- equivalencia, principio de 335,
337
- Erdős, Paul 475-476
- espacio-tiempo
agujeros negros y 346-348,
354, 356, 358
Dios y 372-375
forma 331-341, 345-348, 355
origen del concepto 327-331
singularidades y 355-356, 368
- estimulación magnética transcranial (TMS), 427
- estrella polar 236
- estrellas
colapso 277, 344, 345-346,
347
composición química 18-19
Comte predice que nunca
conoceremos los constituyentes de 18-19, 254, 306,
437, 516
creación 343
desplazamiento hacia el rojo
y 267-270, 277-278, 281
enana blanca 344
espacio-tiempo curvado
y 339-341
forma del universo y 235-237,
262
fusión de átomos 343-344
gigante roja 82
globo celeste de papel 236-
237, 239, 245, 251, 253, 281,
284, 306
Gran Explosión y 275
materia luminosa y 299
- medida distancia/brillo 253-
257, 267-270
- muerte 277
- nebulosa de Andrómeda 255,
256
- paralaje estelar 251-253, 254
- supernovas y 277
- tamaño del universo/infinito y
235-237, 239-242, 253-261
- teoría general de la relatividad
y 339-341
- universo expansivo y 267-
273, 275, 277-279, 281, 284
- velocidad de la luz y 316-317
véase también bajo el epígrafe de los nombres de las estrellas y las constelaciones individuales
- eta, partícula 146
- Euclides 476-479, 506
Elementos 462, 492
- Euler, Leonhard 48, 524
- Everett, Hugh 196
- evolución 8, 15-16, 73-87
árbol fractal de la vida y 79-81
consciencia y 402, 436
Dalai Lama y 446
descubrimiento de nuevos
conocimientos y 8, 292
Dios y 288, 518-519
ecosistemas mal administrados
y 73
explosión de vida en el Cámbrico 76
mutaciones aleatorias y 15,
73-81
origen de la vida y 73-87
probabilidad/teoría del caos
y 72, 73-87

- reconocimiento de patrones
 - y 30
- sistema solar/universo 45-57,
 - 58, 73, 167, 196, 223, 259-
 - 260, 275, 279, 293, 376,
 - 475, 519
- evolución darwinista 288
- expresión génica 15
- extracorporales, experiencias
 - 412-416
- extrañeza 137, 139, 140, 146,
 - 147, 150
- extraterrestres 180, 301
- fenómenos emergentes/emergen-
 - cia 416
- Fermat, Pierre de 36-40, 50,
 - 472, 473
 - último teorema de Fermat 11,
 - 16, 223, 471, 472, 517
- Fermi, Enrico 135
- Fermilab 155
- Ferreira, Pedro 283
- Feynman, Richard 9, 154, 165,
 - 166, 196, 201, 220, 345, 384
- diagramas 154
- Lecciones de física* 199-200
- física cuántica 19, 21, 40, 91, 92,
 - 132, 160, 161, 165-166, 167,
 - 181-200, 201-231, 273, 275,
 - 286, 289, 303, 344, 356, 361,
 - 363, 373, 425, 447, 508, 514,
 - 516
- agujeros negros y 344, 356-
 - 357, 361, 363, 447
- confiar en las matemáticas
 - de 208
- densidad del electron y 160
- efecto del túnel cuántico 209
- efecto Zenón cuántico 190
- electromagnetismo, intento de
 - unificar con 132
- emisión de radiación del
 - uranio radioactivo y 165-
 - 168, 181, 189-190, 191, 200,
 - 202, 209-210, 216, 219,
 - 222, 224, 227, 231
- entrelazamiento cuántico
 - 217
- experimento de la doble rendi-
 - ja y 168-171, 180, 181-193,
 - 198, 203-206, 208, 210,
 - 213, 214, 216, 218
- fluctuaciones cuánticas 230,
 - 231, 286, 290, 361
- función de onda 12, 183-187,
 - 197-200, 209, 213, 218,
 - 225-226, 508
- gravidad cuántica 15, 212, 231
- inflación y 286
- interpretación de Copenhague
 - 225
- lenguaje y 516
- leyes reversibles 356-358, 447
- microscopios cuánticos 101
- naturaleza contraintuitiva
 - 166, 201, 207, 356
- naturaleza corpuscular de la
 - luz y 113, 168-187
- observación y 186-200, 213-
 - 215, 218, 224-225
- principio de incertidumbre
 - y 168, 202, 204, 205-210,
 - 211, 213, 227, 229-231, 305,
 - 333, 344, 361, 363
- relatividad general, unificación
 - con la teoría de la 15, 212,
 - 273-275

- repetición de un experimento 515
- teoría del caos y, *véase* teoría del caos
- Fitch, Frederic 522
- Flanagan, Owen 440
- fluidos, dinámica de 48
- fMRI, escáner 10, 383, 397-398, 406, 419-420, 422-424, 441, 442, 446, 449-450, 526
- fondo cósmico de neutrinos 276
- fotoeléctrico, efecto 176, 177, 180
- fotones 18, 137, 138, 178, 185, 186, 197, 213, 261, 275, 276, 281, 285, 335, 357, 360, 365-36
- Fourier, Joseph 48
- fracciones 106-107, 109, 125, 240, 494, 498-500
- fractales 79, 88-89, 212, 458
 - árbol fractal de la vida 79-81
- Franklin, Melissa 155, 157-158, 301
- Franklin, W. S., 61
- Fraunhofer, telescopio 247
- fuerza electromagnética 136-138, 343
- fuerza nuclear débil 136, 137-138, 138, 139
- fuerza nuclear fuerte 136, 137, 138, 138, 139
- fusión nuclear 343
- gafas de realidad virtual 415
- Galilei, Galileo 12, 35, 36, 41, 111, 242, 249, 295, 322, 369-371, 375, 376, 383, 497
 - Las dos nuevas ciencias* 494-495
- galio 116
- Galle, Johann Gottfried 247, 248
- Gallup, Gordon 399-401
- gamma, ondas 396, 397
- gamma, rayos 129, 165
- Gamow, George 9
 - El breviario del señor Tompkins* 187
- Gardner, Martin 9
- Gastineau, Mickaël 83
- Gauss, Carl Friedrich 495
- Geiger, Hans 127
- Gell-Mann, Murray 139, 140, 146-147, 149-152, 159, 220
- gemelas asimétricas 337-340
- geometría
 - átomos y 104-105, 106
 - axiomas y 463, 464, 476-479
 - consciencia y 409
 - conjetura de Poincaré 11, 50-57, 58, 59, 81, 84, 473
 - datos y, *véase* datos
 - espacio-tiempo y 328, 331-334, 372, 373
 - Euclides y 340, 462-463, 476-477, 479, 492, 506
 - forma del universo y 262-263, 328, 331-333
 - fractales y 79
 - geometrías esférica e hiperbólica 478-479, 506
 - gravedad y 334
 - griegos, antiguos 32, 44, 328, 340, 462-463, 464, 470, 472, 477-479, 492-493, 506
 - luz y 168, 262-263
 - números imaginarios y 527
 - postulado de las paralelas 476-479, 506

- simetrías y 142-145, 148, 159
 vacío y 231
 geometrías hiperbólicas 478, 506
 Gettier, Edmund 520
 Gödel, Kurt 332, 458, 475, 483-489, 490, 502, 505, 507, 508, 522
 Goldbach, conjetura de 473, 489
 Google 13
 Gordon, Carolyn 282
 Gould, Stephen Jay 80
 Grabski, Juliusz 87
 grafeno 11
 Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN 10, 126
 Gran Explosión 297, 474
 como mito creacional 295
 comprobación de las condiciones de la 294
 existencia del tiempo antes de 15, 17, 310, 329-334, 356, 364, 365-371, 513
 radiación de fondo de microondas y 282, 285, 362
 singularidad 348-349, 353, 356
 surgimiento de la consciencia y 402, 474, 513
 universo infinito y 273-277
 gravedad
 agujeros negros y 343-346, 347, 353, 355, 365
 concepto de aeón y 365, 368
 consciencia y 402
 constante gravitatoria 288
 cuántica 15, 212, 230-231, 268-269, 273
 cuatro fuerzas fundamentales y 136
 fuente de cesio y 315
 materia oscura y 284
 singularidades y 349-350, 353-354
 teoría general de la relatividad describe la naturaleza de la 268, 334-341, 353
 teorías de Newton de 41-42, 45, 46, 48, 52, 53, 95, 113, 247, 349
 universo expansivo y 268, 278, 279, 459
 Gregory, James 243-244
 griegos, antiguos 32-33, 44, 103, 107, 108, 109, 137, 236-237, 249, 251, 275, 328, 461, 463, 465, 467, 470, 472, 491, 492, 493
 Grishchuk, Leonid 283
 grupos, teoría de 471
 gusano *C. elegans* 11, 433, 434, 439
 Guth, Alan 286
 Haldane, Andrew 71
 Halley, Edmond 244
 Harrington, Leo 489
 Harvard, observatorio del Colegio de 254
 Harvard, Universidad de 155, 472
 Hawking, Stephen 198
 agujeros negros y 230-231, 347, 362-364, 368, 370, 375
 Breve historia del tiempo 17, 347
 forma del espacio-tiempo y 333

- radiación de Hawking 361-365
sobre la «ilusión del conocimiento» 530
- Haynes, John-Dylan 422-425
- Heisenberg, Werner 137, 144,
157, 166, 202, 206, 211, 213,
227, 490
véase también incertidumbre,
principio de
- Herón de Alejandría 249
- Herschel, Friedrich Wilhelm 245,
246, 248, 252
- Hertz, Heinrich 123
- Higman, Graham 473-474
- Hilbert, David 481-485, 487,
502, 505
- Hipaso 107
- homogeneidad 294, 383
- Hooker, telescopio de 256
- horizonte cósmico visible 267,
276, 277, 279, 283, 284, 287,
289, 305
- horizonte de sucesos 346, 347,
348, 354-358, 360-364, 511
- Hubble, Edwin 256-257, 265,
268-269, 273
- Hume, David 523
- Hyatt, John Wesley 117
- I Ching* 39
- Iagñavalkia 521
- Iglesia católica 242, 295
- Imperial College, Londres 146
- incertidumbre, principio de 40,
165, 168, 181, 193, 194, 196,
202, 204, 205-210, 211, 213,
227, 229, 298, 305, 333, 344,
361, 363
- incognoscibilidad, paradoja
de 168, 220-221, 226, 516,
522, 526
- «inferencia hacia la mejor explicación», 292
- infinito 87
Cantor y 495-507, 512
Cohen y 507
comparando el tamaño de diferentes infinitos 493-494
complejidad infinita 84-87,
212
contando infinitos 502
divisibilidad infinita del tiempo y del espacio 110, 111
existencia física 235-242
hipótesis del continuo y 505-506, 508, 510, 511
historia de la idea 491-495
matemáticas y 87, 105, 107,
108, 109, 110, 112, 122, 152,
160-161, 198, 212, 228, 306,
346-354, 471-472, 474-476,
480, 484-485, 489, 491-532
potencial y actual 492, 494
probando 511-512, 513
regresión infinita 161, 228,
507, 512
reino animal y 495-497
símbolo para 495, 502
teología/religión y 494, 496,
502, 507, 512
universo infinito 15, 71,
235-242, 258, 271, 273,
274, 281-285, 297, 298,
302-306, 309-310, 331, 370,
491, 494, 496, 511-512, 513,
529
- inflación 286

- información integrada (IIT),
teoría de 430, 437, 439
- Ingenhousz, Jan 119
- Innes, Robert 253
- inteligencia artificial 352, 527
- Jaynes, Julian 402, 403
- Joyce, James: *Finnegans
Wake* 149, 150
- Júpiter 83, 239, 243, 246, 249-
250
- Kac, Mark 282
- Kant, Immanuel 181, 183, 256,
526, 528
- kaones 135, 136, 140, 146, 150
- Kapitaniak, Marcin 87
- Kapitaniak, Tomasz 87
- Karolinska, Instituto, Suecia 414,
415
- Kelvin, lord 19, 21
- Kennard, Earle 206
- Kepler, Johannes 41, 47, 243
- Khayyam, Omar: *Los Rubai-
yat* 266
- King's College, Londres 146
- Klein-Gordon, ecuaciones de 154
- Koch, Christof 404-410, 412,
436-447, 453
- Kronecker, Leopold 503
- Kurzweil, Ray 16, 352
La singularidad está cerca 352
- Laboratorio Físico Nacional,
Londres 315
- Lakatos, Imre: *Pruebas y refuta-
ciones* 524
- Lamb, Willis 135
- Lambert, Johann Heinrich 109
- Laplace, Pierre-Simon 48, 50,
84, 93, 94, 95, 167, 196, 345
*Ensayo filosófico sobre las
probabilidades* 48
- Lascaux, cuevas de, Francia 30,
312
- Laskar, Jacques 83
- Leavitt, Henrietta 254-257
- Lecoq de Boisbaudran, Paul-
Émile 116
- Leibniz, Gottfried 12, 93, 316
- Lemaître, Georges 268-269, 273
- lenguaje
competencia lingüística y
desempeño lingüístico, dis-
tinción entre ambos 490
consciencia y 384, 387-388,
390, 391, 396, 426, 443,
449-451
límites del conocimiento y 516
naturaleza paradójica/resbala-
diza 458, 480, 483
origen 482
- Leonardo da Vinci 386
- Leverrier, Urbain 247-248
- Ley de las octavas 116
- leyes de la naturaleza, búsqueda
de las definitivas 33, 50, 298
- leyes del movimiento de New-
ton 45, 47, 48, 49, 50, 51, 88,
112, 124
- libre albedrío 33, 92, 219-220,
421-422, 424-425, 482
- Lightman, Alan: *Sueños de Ein-
stein* 342
- Linde, Andréi 286
- Lippershey, Hans 242
- Lloyd, Seth: «El poder de compu-
tación del universo» 474

- Lorenz, Edward 59-61
 «¿Podría el batir de alas de una mariposa en Brasil provocar un tornado en Texas?» 61
- Lucas, John 488-489
 «Mentes, máquinas y Gödel» 488
- Lucrecio: *De la naturaleza* 119, 120
- Luis XI, rey 33
- Luminet, Jean-Pierre 282
- Luna 30, 47, 52, 53, 237, 238, 238, 239, 249, 259, 314, 334
- luz
 agujeros negros y 345-346, 347, 353, 357, 361
 análisis de la luz emitida por las estrellas 18-19, 253-257
 curvatura del espacio y 345-346
 efecto Doppler y 267-268
 fuerza electromagnética y 137
 Gran Explosión y 276, 353
 longitudes de onda roja y azul 267-273, 275, 277-278, 281
 medida de la distancia a los planetas y 269-270
 medida de las galaxias a partir de 268
 naturaleza como partícula 113, 168-187
 rayos catódicos y 122-123
 teoría de acones y 366
 teoría de Newton 113, 168-169
 teoría especial de la relatividad y 316-323, 324, 326, 328-329, 330, 335, 337-341, 353
 universo expansivo y 267-270, 278, 280, 515
 universo infinito y 261-265, 275
 velocidad 95, 133-134, 222, 248-251, 271, 280, 285, 316-323, 324, 327-330, 337-341, 344-345, 353, 366
véase también fotones
- Lyapunov, exponente de 82
- Mach, Ernst 118, 312
- Magallanes, Fernando de 259, 261, 265
- Magallanes, Pequeña Nube de 255
- Major, John 69
- Manhattan, proyecto 148
- Marino, Lori 400
- Markram, Henry 443
- Marte 239
- matemáticas
 avances en las 11, 473-476
 certeza y 459-460
 ciencias en comparación con las 459-460
 consciencia y, *véase* consciencia
 conjeturas como savia vital de las 531
 dados y, *véase* dados
 de los antiguos griegos *véase* Grecia, antigua
 demostración y 14, 460-469, 475-476, 505-506, 511-512, 527
 demuestran que algunas cosas están fuera del alcance del conocimiento 465-469, 506, 511-512, 527

- Dios y, *véase* Dios
física cuántica y, *véase* física
cuántica
hipótesis del universo matemá-
tico (MUH) 373-374
infinito y, *véase* infinito
«irrazonable eficacia de las
matemáticas» 375
límites de los sentidos y 527
lo desconocido en las, *véase*
bajo el nombre individual
del área correspondiente de
las matemáticas
naturaleza fuera del tiem-
po 373-374
¿podemos saberlo todo en
las? 523-528
resolución de los grandes pro-
blemas abiertos 473-476
teoremas *véanse bajo el nombre*
individual del teorema
correspondiente
véase también bajo el nombre
individual del área corres-
pondiente de las matemá-
ticas
materia luminosa 299
materia oscura 15, 283
Maxwell, James Clerk 62, 63,
171, 180, 530
ecuaciones de 48, 179
Materia y movimiento 62
May, Robert M. 64, 66, 68-73,
75, 94
«Modelos matemáticos sen-
cillos con dinámica muy
complicada» 64-68, 73
teoría del caos y 64-71, 72, 73,
75, 94
McCabe, Herbert 25, 229
McGurk, efecto 413
Mendeléyev, Dmitri 114, 115-116,
135, 137, 147
Mercurio 83-84, 239, 244
Méré, caballero de 36-37
Mermin, David 195
Messiaen, Olivier 384
Michell, John 345
Michelson, Albert Abraham 19,
316, 318, 319, 345
microscopios 100-101, 113, 119,
131, 383, 386, 491, 526
microscopios electrónicos 101
Millikan, Robert Andrews 179-
180
Minkowski, Hermann 327-328,
339
misterianismo 440, 442
Mittag-Leffler, Gösta 55-56, 257,
503, 504
Moore, ley de 16, 352
Mora, Patricia 351
Morley, Edward 316, 318, 319, 345
muerte
ciencia y la batalla contra la 8
consciencia y 16, 401, 447
demencia y 401
vida después de la 16, 447
multiverso 285-287, 290, 291,
293-294, 298, 304, 374, 482,
510
mundos múltiples en física, inter-
pretación de 196, 197
muón 133-135, 323-324
Museo de Historia de la Cien-
cia 237
música 99-105, 109, 113, 115,
129, 154, 155, 160, 161, 174,

- 175, 176, 223, 245, 387, 395,
529
- Nature* 16, 64, 70
- Navier-Stokes, ecuaciones de 48
- Ne'eman, Yuval 146
- Necker, cubo de 404, 406, 413
- Neddermeyer, Seth 133
- Neptuno 248, 284
- neuronas
- consciencia y 12, 389, 392-
395, 407-415, 427, 429,
431, 432-435, 437, 438,
440, 441, 442, 452, 474
 - descubrimientos de Ramón y
Cajal 392-394, 438
 - envejecimiento y 323, 325
 - neurona de Jennifer Anis-
ton 10, 408-410, 436, 452
 - publicada la red neuronal
completa del gusano *C.*
elegans 11, 434, 439
- neutrinos 133, 276, 277, 514
- neutrón 101, 115, 122, 128-130,
131, 133, 135-137, 140, 147,
150, 158, 159, 160, 208-209,
210
- New Scientist* 9, 10
- Newlands, John 116
- Newton, sir Isaac 12, 13, 41-42,
111, 177, 196, 212, 226, 328, 341
- cálculo y 43-45, 111
 - datos y 49-50, 195
 - Dios y 92-93
 - espacio y tiempo, visión de la
naturaleza absoluta de 315-
317, 328
 - gravedad y 41, 43, 45, 47, 51-
52, 53, 94-95, 112, 246, 349
 - leyes del movimiento y 41,
45-52, 53, 88, 94-95, 100,
112, 124, 167, 193, 195, 201,
349, 351
 - movimiento planetario y 46-
53, 94, 351
 - Óptica* 113, 168
 - Philosophiae naturalis principia
mathematica* 41, 45-48, 113,
315, 322
 - relatividad y 322
 - teoría de la luz 113, 168, 170,
177
 - teoría del Todo y 48
 - vida 41-42
- Nishijima, Kazuhiko 139
- no conmutatividad 207
- Nobel, premio 11, 135, 180, 257,
296, 404
- novas 256
- nucleones 137
- números, teoría de 472, 476,
484-489, 507-509
- números enteros 103, 104, 106,
108, 109, 114, 125, 129, 160,
306, 471, 472, 498-503, 505-
506, 510
- números imaginarios 468, 469,
517, 527
- números irracionales 108, 109-
110, 305, 306
- números negativos 467, 468
- números primos 16, 198, 484-
485, 492, 509, 524
- observaciones, física cuántica
y 186-200, 213-215, 218,
224-225
- Observatorio, Real 248

- Occam, navaja de 292
 omega, partícula 147
 ontología 92, 214, 215, 226, 227, 528
 Oppenheimer, Robert 148
 ordenadores
 consciencia/inteligencia artificial y 16, 352, 382, 399, 405, 409, 423, 425-426, 434-436, 443, 444, 447, 527
 crecimiento de la potencia 16, 70, 352
 modelado de la teoría del caos 81, 84
 Oresme, Nicolás 239-240, 295, 493-497
 Oscar II de Noruega y Suecia, rey 52
 Owen, Adrian 420
 Pais, Abraham 139
 Papplewick, estación de bombeo de 172-173, 175
 paralaje 252-254
 paralaje estelar 252, 253
 paralelas, postulado 477-479, 506, 518
 Paris, Jeff 489
 partículas fundamentales 15, 40, 144-145, 147, 149-150, 152, 161, 216, 323
 Pascal, Blaise 36-40, 50
 apuesta 38-40, 302, 304
 Pensamientos 491
 Penrose, Roger 348, 364-371, 489
 pentaquark 153, 157
 Pepys, Samuel 49-50
 perceptronium 448
 Perelman, Grigori 473
 Perrin, Jean Baptiste: *Les atomes* 120
 piones 135-136, 140, 146, 150
 Pitágoras 103, 106, 107, 149, 161, 319, 320, 320, 327, 408, 410, 452, 457, 465, 471
 Planck, Max 174-175, 177-178, 206, 514
 constante de Planck 174-175, 177-178, 206, 514
 longitud de Planck 211-212, 514
 misión Planck 282
 planetas
 detectando nuevos 245-248, 252, 284
 distancias entre 242-245
 medida del tiempo y 314, 324, 334, 337, 349-350, 351
 modelado de las trayectorias futuras de los 83-84, 94
 movimiento de los 41, 47-57, 81-84, 94, 112, 243, 349, 351
 multiverso y 289
 música de las esferas y 104
 nuevos planetas habitables 10
 singularidades y 351
 Platón 104-105, 144, 236, 237, 262, 382, 463, 470, 517, 520
 Pléyades 30, 312, 313
 poblaciones, dinámica de 65-68
 Podolsky, Boris 217
 Poincaré, Henri 11, 50-51, 53-57, 58-59, 81, 84, 473
 Poisson, Siméon-Denis 48
 Polkinghorne, John 90-92, 220-226, 302, 447

ÍNDICE

- Popper, Karl 292, 300, 524
 PORC, hipótesis 473, 530
 Preskill, John 363
 primos gemelos, conjetura 473
 probabilidad 31-33, 39-40, 50,
 90-93, 304
 propiocepción 526
 protón 101, 115, 122, 126, 128-
 130, 131, 133, 135, 136-137, 138,
 139-140, 146, 147, 149, 150,
 151, 152, 157, 158, 160, 209,
 288, 343
 Proxima Centauri 236, 253

 qualia 409, 441, 449
 quark
 abajo 148, 150
 arriba 148, 150
 cima 10, 152, 153, 155
 encantado 152
 extraño 148, 150
 fondo 152
 quidditismo 374, 375
 química
 antiguos griegos y 104-105
 avances 11
 concepto de emergencia y 417
 del cerebro *véase* cerebro
 elementos y 104-105
 visión atomística de la materia
 y elementos químicos 104,
 105, 111-113, 114-119; *véase*
 también tabla periódica

 Rabi, Isidor 134
 radiactividad 126, 136, 165, 167,
 168, 216
 Ramón y Cajal, Santiago 392-
 393, 438

 rayos cósmicos, interacciones
 de 132, 133-134, 159, 179, 323
 Rees, Martin 529
 Reiss, Diana 400
 relatividad, teorías de la 21, 94,
 180, 212, 273, 310
 relatividad especial 133, 177, 317,
 320, 328, 335, 344, 372, 453
 relatividad general, teoría 12, 13,
 15, 146, 275, 332, 338, 342,
 348, 353, 357, 361, 367
 religión 22-23, 25, 222, 223, 228,
 229, 295-298, 496, 504, 507,
 517, 518, 519
 véase también Dios
 reloj atómico 156, 315
 retórica, arte de 463-464
 Riemann, Bernhard 327, 473,
 475, 489, 507, 509, 521, 530
 Robertson, Howard 206
 Robinson, Julia 507
 Romer, Ole 250
 Rosen, Nathan 217
 Rosetta, piedra 143
 Rovelli, Carlo 376, 377
 Rufo de Éfeso 385
 Rumsfeld, Donald 20
 Rushdie, Salman: *Hijos de la*
 medianoche 309, 330
 Russell, Bertrand 479, 480, 481,
 520
 Rutherford, Ernest 126-129, 152

 S₄ (grupo de simetrías) 142, 143
 Sartre, Jean-Paul 424
 Saturno 83, 239, 246
 Schopenhauer, Arthur 99, 100
 Schrödinger, Edwin 12, 166, 184,
 193, 194, 223

- Schumacher, Heinrich Christian 495
Scientific American 9
 Searle, John 426
 sentidos
 experiencias extracorporales 413-416
 límites 526-528
 Serber, Robert 148, 149, 151
 61 Cygni 252, 253
 Shakespeare, William 274, 504
 Shapely, Harlow 256
show de Truman, El 257-258
 Shull, Clifford 208, 210
 simetría 131, 132, 140-144, 152, 153, 154, 159, 338, 342, 431, 471, 473
 multifacética 144-148
 sinestesia 384, 409
 singularidad 16-17, 94-95, 273, 275, 298, 342-343, 348-354, 355, 356, 363, 364, 367, 368, 369
 Smithsonian de Historia Natural, Museo, «El gran debate» en 256
 Sociedad para el Avance de la Ciencia Natural de Londres, Real 411
 Sócrates 520
 Sol 236, 237, 238, 243, 246, 250-251, 253, 255, 344
 agujeros negros y 346, 347
 como centro del universo 243, 284, 521
 composición química 19
 creación 343
 distancia de la Tierra 243-245, 252-253, 259
 entropía y 360
 espacio-tiempo curvado y 340
 estrellas cefeidas y 255, 257
 gigante roja, evolución hacia una 82-83
 gravedad y creación 343
 masa 47, 344
 medida del tiempo y 314, 316, 340
 patrón del movimiento 30, 236, 284, 314, 316, 340
 planetas que orbitan en torno a 222, 243-246, 284
 tamaño 238
 trigonometría y 238, 253
 velocidad de la luz y 249, 251, 253, 316
 Sphinx, observatorio (Suiza) 266, 279
 Stanford, universidad de 286, 505
 Centro del Acelerador Lineal de Stanford 151
 Stoppard, Tom: *Arcadia* 29, 70
 Strzałko, Jarosław 87
 SU(3) (objeto simétrico) 141, 143
 SU(6) (objeto simétrico) 153
 sueño, consciencia y 396-397, 427-430, 431
 supernova 277, 344
 tabla periódica 116, 122, 124, 125, 129, 131, 135, 147, 159, 344
 Taleb, Nassim: *El cisne negro* 21
 Tales de Mileto 461
 Tartaglia, Niccolò Fontana 37
 tecnología
 estudio del cerebro y 385, 395, 415, 423

- singularidad 352
- tasa de cambio/crecimiento 16, 352
- Tegmark, Max 373, 374
- telescopio
 - Andrómeda y 256
 - de papel 405-406, 410, 412
 - descubrimiento de nuevos planetas y 9, 245-248
 - invención 237, 238, 242-245, 251, 371, 383
 - medida distancia a los planetas y 243-245
 - neuronales 383, 395-398, 406
 - nombre 242
 - paralaje estelar y 252
 - trigonometría como 237-239
 - velocidad de la luz y 249-251
- telómeros 11-12
- Templeton, Fundación 296, 297
- Templeton, sir John 295-296
 - premio Templeton 296, 297, 298
- termodinámica, segunda ley 358, 360, 364, 368, 442
- Thomson, J. J., 122, 123-126, 133, 176
- Thorne, Kip 347, 363, 364
- tiempo
 - agujeros negros y, *véase* agujeros negros
 - antes de la Gran Explosión, existencia 15, 17, 311, 328-334, 356, 364, 365-371, 513
 - cálculo y 43-44
 - como expresión de la incompletitud del conocimiento 375-377
 - concepto de aeón y 367-371
 - creencia de Leibniz en la naturaleza relativa de 316
 - creencia de Newton en la naturaleza absoluta de 316, 317, 328
 - desintegración del muón y 323-325
 - día, medida de 314
 - Dios y espacio-tiempo 372-375
 - Einstein y, *véase* Einstein, Albert
 - emergencia y 417
 - entropía y 359-360
 - equivalencia y 335-337
 - espacio y tiempo, divisibilidad infinita 111, 315-317, 327-331
 - espacio-tiempo, origen del concepto 328-331
véase también espacio-tiempo
 - existencia 15, 375-377
 - forma 331-341
 - futuro del universo y 365-369
 - gemelos asimétricos y 337-338
 - hipótesis del tiempo término 377
 - infinito 241
 - naturaleza 309-341, 342
 - naturaleza relativa 315-331
 - principio de incertidumbre de Heisenberg y 29-31
 - ¿qué es? 312-315
 - relatividad especial y 177, 180, 310, 315, 317-331, 337-341, 345, 353, 372
 - relatividad general y 12, 13, 15, 146, 180, 212, 273, 275, 310, 332, 334-341, 342, 348, 353, 357, 367

- reloj atómico 156, 315, 318,
337
segundo, medida 314
velocidad de la luz y 95, 133,
222, 248-251, 271, 280,
285, 316-323, 325, 326, 329,
330, 335, 337-341, 345, 353,
366
véase también espacio-tiempo
tiempo atmosférico, predicción
61-62, 80, 81, 82-83
tiempo térmico, hipótesis 377
todo, teoría 17, 48
Tomás de Aquino, santo 373, 493
Tononi, Giulio 427-428, 430-
432, 434-439, 444, 447
trigonometría 237-238, 243, 245,
252
turbulencia 16
Turing, Alan 190-191, 425-426,
452

Universidad de California 426
Universidad de Hertfordshire 411
Universidad de Wisconsin-Ma-
dison: Centro del Sueño y la
Consciencia de la 427
Universidad de Yale 106
University College de Londres
(UCL), 287
universo
colisiones 287
de recortables 236, 239, 245,
253, 281, 284, 306
Dios y, *véase* Dios y religión
entropía y, *véase* entropía
expansivo *véase* universo
expansivo
fin 365-371
finito sin bordes 257-265
forma 237, 260, 261-265,
289-290, 343-349, 355, 388
hipótesis del universo mate-
mático (MUH) 11, 373-374,
509
holográfico 364
infinito 15, 71, 235-242, 258,
271, 273, 274, 281-285,
297, 298, 303-306, 310,
331, 370, 491, 493, 496,
511-512, 513, 529
mecánico/determinista 48-50,
53, 91, 93, 95, 167, 195, 199
multiverso 285-287, 290, 291,
293-294, 298, 304, 374,
482, 510
nacimiento del, *véase* Gran
Explosión
rebobinado 273-277
simulación 528
surgimiento de la consciencia
en 402
«universos isla» 256
universo expansivo 10, 12, 15,
267-287, 310, 366, 368, 369,
421, 459
descubrimiento 267-273, 459
Gran Explosión y 273-277
multiverso y 285-295
ritmo acelerado de expan-
sión 10, 15, 276, 277-281,
365, 459, 515
universo infinito y 281-287
universo matemático, hipótesis
(MUH) 11, 373-374, 509
«universos isla» 256
Upsilon Andromedae 84
Ur (Mesopotamia) 32

ÍNDICE

- ul style="list-style-type: none; padding-left: 0;">
- uranio 126, 165, 167-169, 173, 181, 190-191, 200, 202, 210, 211, 216-217, 219, 221-225, 344
 - Urano 246-247, 252
 - Venus 83-84, 239, 243-244, 244, 266
 - Vía Láctea 255, 256, 284
 - vida media 323, 324
 - Vilenkin, Aleksandr 286
 - Villard, Paul 129
 - violonchelo 99-100, 102, 104-105, 116, 154, 160-161, 173-177, 281, 357, 383-384, 388, 393, 396
 - Virgo, constelación 236
 - vitalismo 451
 - von Foerster, Heinz 351
 - Wallis, John 495, 502
 - Weil, André 488
 - Well, David 282
 - Wernicke, Carl 388
 - Wheeler, John 345
 - Wigner, Eugene 375
 - Wikipedia 12, 13
 - Wiles, Andrew 472-473, 517, 531
 - Williamson, Timothy: *El conocimiento y sus límites* 521-522
 - Wilson, monte (California) 134, 135, 256
 - Wiseman, Richard 411
 - Wittgenstein, Ludwig 449-451, 524
 - Investigaciones filosóficas* 449
 - Tractatus logico-philosophicus* 530
 - Wolpert, Scott 282
 - Woodin, Hugh 510
 - Wright, Thomas 255-256
 - xi, barión 136, 146, 150
 - Young, Thomas 169, 171, 180, 181, 182, 185, 186
 - Zeldóvich, Yákov 283
 - Zenón de Elea 112, 190
 - Zhihong Xia 94, 351
 - Zweig, George 150, 151

ESTA EDICIÓN, PRIMERA, DE
«LO QUE NO PODEMOS SABER», DE MARCUS DU
SAUTOY, SE TERMINÓ DE IMPRIMIR
EN CAPELLADES EN EL
MES DE MARZO
DEL AÑO
2018



*Otras obras del autor
publicadas en esta editorial*

LA MÚSICA DE LOS NÚMEROS PRIMOS
EL ENIGMA DE UN PROBLEMA
MATEMÁTICO ABIERTO
El Acantilado, 143

SIMETRÍA
UN VIAJE POR LOS PATRONES
DE LA NATURALEZA
El Acantilado, 195

LOS MISTERIOS DE LOS NÚMEROS
LA ODISEA DE LAS MATEMÁTICAS
EN LA VIDA COTIDIANA
El Acantilado, 253

Colección El Acantilado

Últimos títulos

345. FRANK DIKÖTTER *La gran hambruna en la China de Mao. Historia de la catástrofe más devastadora de China (1958-1962)*
346. MARÍA BELMONTE *Los senderos del mar. Un viaje a pie (2 ediciones)*
347. CHRISTIAN INGRAO *Creer y destruir. Los intelectuales en la máquina de guerra de las SS (2 ediciones)*
348. ANDRÉ SALMON *La apasionada vida de Modigliani*
349. DANILO KIŠ *Homo poeticus. Ensayos y entrevistas*
350. VASILI RÓZANOV *El apocalipsis de nuestro tiempo*
351. NICOLE LORAUX *Los hijos de Atenea. Ideas atenienses sobre la ciudadanía y la división de sexos*
352. JUAN ANTONIO MASOLIVER RÓDENAS *La negación de la luz*
353. ADAM ZAGAJEWSKI *Asimetría*
354. G. K. CHESTERTON *Ensayos escogidos. Seleccionados por W. H. Auden*
355. GIUSEPPE TOMASI DI LAMPEDUSA *Viaje por Europa. Correspondencia (1925-1930)*
356. NUCCIO ORDINE *Clásicos para la vida. Una pequeña biblioteca ideal (2 ediciones)*
357. JAN SWAFFORD *Beethoven. Tormento y triunfo (3 ediciones)*
358. LAURA J. SNYDER *El ojo del observador. Johannes Vermeer, Antoni van Leeuwenhoek y la reinención de la mirada*
359. CHARLES ROSEN *Las fronteras del significado. Tres charlas sobre música*
360. RAFAEL MONEO *La vida de los edificios. La mezquita de Córdoba, la lonja de Sevilla y un carmen en Granada (2 ediciones)*
361. FRANCISCO DE HOLANDA *Diálogos de Roma*
362. YANNIS RITSOS *Agamenón*
363. JOSEP MARIA ESQUIROL *La penúltima bondad. Ensayo sobre la vida humana*
364. BERNARD SÈVE *El instrumento musical*